



# Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange

Adnane Lazrak

## ► To cite this version:

Adnane Lazrak. Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange. Automatique. Ecole des Mines de Nantes, 2015. Français. NNT : 2015EMNA0217 . tel-01273999

**HAL Id: tel-01273999**

**<https://theses.hal.science/tel-01273999>**

Submitted on 15 Feb 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Thèse de Doctorat

**Adnane LAZRAK**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du  
grade de Docteur de l'École des Mines de Nantes  
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences et technologies de l'information, et mathématiques (ED STIM)

Discipline : Automatique et Informatique appliqué

Spécialité : Génie industriel

Unité de recherche : IRCCyN

## **Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange**

**Soutenue le : 2 décembre 2015**

**Thèse N° : 2015 EMNA 0217**

## **JURY**

Rapporteurs : **M. Michel GOURGAND**, Professeur des Universités, Université Blaise Pascal

**M. Jacques LAMOTHE**, Professeur des Ecoles des Mines, Mines D'Albi

Examineurs : **M<sup>me</sup> Sylvie NORRE**, Professeur des Universités, Université Blaise Pascal

**M. Alexandre DOLGUI**, Professeur des Ecoles de Mines, Ecole des Mines de Nantes

Invité(s) : **M. François CATHELIN**, Manager Chaîne logistique, GE Healthcare

**M. Robert HEIDSIECK**, Manager Chaîne logistique, GE Healthcare

Directeur de thèse : **M. Bruno CASTANIER**, Professeur des Universités, ISTIA Université d'Angers

Co-encadrant de thèse : **M. David LEMOINE**, Maître Assistant, Ecole des Mines de Nantes





## Dédicaces

Je dédie ce travail à ces personnes de l'ombre qui sans le savoir m'ont permis d'en arriver là où je suis :

A mes chers parents, Mama et Baba, ma raison d'être, le secret de ma motivation, ceux qui ne vivent que pour leurs enfants, ceux qui ont été toujours à mes cotés aux pires et meilleurs moments, pour vos sacrifices je vous dédie cette thèse que vous me l'avez tant souhaiter.

A mes deux sœurs Hanane et Imane, mes protégées, mon oxygène, ma joie et mon bonheur.

A ma famille grands parents, tantes, oncles, cousins et cousines, merci pour vos pensées, votre présence, à mon oncle qui a rendu l'âme pendant la rédaction des dernières pages de cette thèse.

Si certains souffrent de moments de baisse de morale pendant une thèse, moi j'ai pu les éviter grâce à la joie de vivre et la grande présence d'une précieuse amitié qui dure depuis plus de 8 ans, Sara, Safia, Hajar, Manal, Kaoutar, Abdou et Zak. Merci pour votre grand soutien pendant cette période de thèse et bien avant. ô combien j'ai de la chance de vous connaître. Merci particulier à Sara pour ton aide qui a éclairé les derniers mois de ma thèse.

A mon autre groupe d'amis, les amoureux du débat politique et de la pensée sociologique, Leila, Salma, Oumaima, Badr, Hamza, Montassir...merci pour votre amitié, merci de m'avoir donné goût à lire autres choses que mes articles.

A l'ensemble de mes amis au Maroc et en France.

A Gayané, Christelle, Patrick, Hilmy, Tawfik...mes collègues et amis, pour votre bonne humeur, pour les régulières discussions sur les sciences de la vie et de la terre.

Ça commence par un petit geste qui change notre destinée : je ne voulais plus faire comme les autres, un soir je tape sur google « Master génie industriel », je viens aux Mines de Saint-Etienne, je discute avec M.Stéphane Dauzère-Pérés, M.Alexandre Dolgui, M.Xavier Boucher, ils me donnent envie de faire une thèse. Je vois la proposition de la thèse gestion de stocks EMN/GEHC, j'ai le coup de foudre, je passe la journée à discuter du sujet avec Robert, je rencontre par la suite David, Bruno, Cyrille, Frederic, Jerome, Patrick, Samuel, François, Mike...ça fait déjà plus que 3 ans et je ne m'en lasse pas, donc je continue, à vous tous merci de m'avoir adopté scientifiquement et professionnellement pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui.

## Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail, Madame Sylvie NORRE de me faire l'honneur de présider le jury, Messieurs Michel GOURGAND et Jacques LAMOTHE de rapporter mon manuscrit de thèse et Monsieur Alexandre DOLGUI d'examiner mes travaux.

Je remercie Bruno CASTANIER et David LEMOINE. Pour leur encadrement, pour leurs disponibilité pendant toutes les étapes de la thèse, pour leurs patience et pédagogie. Pour m'avoir reorienter vers les bonnes pistes pendant des moments cruciales de la thèse, pour leur compréhension des contraintes associées à une thèse CIFRE.

Je remercie l'ensemble des membres de l'équipe SLP de l'EMN, corps professoral et administration, un merci particulier à Isabelle, je pense aussi aux anciens doctorants et surtout les nouveaux, je vous souhaite bon courage.

Grand Merci aux membres du service de formation doctorale de l'EMN : Délphine, Michelle et Sylvie pour votre assistance dans les multiples démarches administratives.

Je dois également un Merci très chaleureux à mes encadrants industriels et mes managers, pour leur suivi des applications industrielles de mes travaux de recherche, leur soutien et leur confiance, leur souciance de la mise en valeur et la globalisation de l'ensemble de mes propositions : Cyrille THENOT, Robert HEIDSIECK, François CATHELINEAU, Frederic PIQUET, Jerome DUHAMEL et Coumba DIOP, j'ai de la chance de commencer ma carrière parmi vous.

Mes remerciements vont aussi à toute la grande famille GPRS sans exception à BUC (France) à Milwaukee (USA) et à Bangalore (Inde)... pour m'avoir accueit et accompagné pendant cette thèse et pour m'avoir aidé sur plusieurs de projets et surtout pour avoir cru en l'importance d'utiliser une démarche scientifique dans des processus opérationnels. Je pense surtout à l'équipe de planning avec laquelle j'ai le plaisir de travailler chaque jour : Michael MCMULLEN, Patrick LOURDEL, Pavan VENKATA, Dinesh PESWANI, Esther EDWARD et Sai KRISHNA.

## Résumé

Le cadre général des travaux de cette thèse est la chaîne logistique des pièces de rechange et particulièrement l'amélioration de sa performance en prévision et en gestion des stocks à plusieurs niveaux de service. La spécificité d'une demande faible et erratique ne permet pas l'utilisation des approches classiques de prévision. Par ailleurs, les mesures de performance associées reposant sur des indicateurs purement statistiques ne reflètent pas nécessairement les objectifs de gestion d'une chaîne logistique qui cherche à s'aligner avec différents niveaux d'exigences des contrats de maintenance.

Après une description des processus et des outils en prévision et en gestion de stocks utilisés dans ce contexte, ces travaux proposent de nouvelles approches de sélection des méthodes de prévisions qui intègrent prévision et gestion de stocks, qui permettent la priorisation en service ou en inventaire et qui utilisent une segmentation par profil de la demande et par niveau de maturité des pièces. Par la suite, ces travaux considèrent le cas de la différenciation client dans le modèle de gestion de stocks basé sur des prévisions, en comparant la performance de la politique à niveau critique avec les politiques classiques à stock commun ou séparé.

Chaque processus étudié a été accompagné d'une analyse comparative entre différentes méthodes de prévisions et politiques de gestion de stocks sur des données réelles du cas d'application industrielle de la chaîne logistique de GE Healthcare. Ce qui a permis de construire un ensemble de recommandations en fonction de la segmentation de la pièce et des priorités des décideurs.

## Mots clés

**Chaîne logistique des pièces de rechange, segmentation, méthode de prévision, politique de gestion de stocks, différenciation client, analyse de performance.**

## Abstract

The main scope of these works is the spare parts supply chain management, particularly the improvement of forecasting and inventory management performance. The specificity of low and erratic demand does not allow the use of conventional approaches of forecasting. Moreover, the associated performance measurements, based on purely statistical indicators, are not adapted to this context. Indeed, it should align with different levels of expectations of the maintenance contracts.

After a presentation of the processes and tools used by the dedicated literature. Here we propose new performance analysis approaches seeking to combine the statistical performance of forecasting methods and inventory management performance while considering decision makers priorities and using demand pattern as well as parts age segmentations. These works also address the use of customer differentiation in the inventory model based on forecasting by comparing the performance of the critical level policy with the common stock and separated stock policies.

Each studied process was associated with a comparative analysis of different forecasting methods and inventory management models based on real data of the spare parts supply chain of GE Healthcare, which allowed us to define a set of methods and parameters recommendations according to both part segmentations and supply chain priorities.

## Keywords

**Spare parts supply chain management, forecasting methods, inventory management, parts segmentation, customer segmentation, performance analysis.**



# Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	ii
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vii
 Introduction générale .....	 1
 Première partie Positionnement, état de l’art et objectifs des travaux.....	 5
Chapitre 1 : Positionnement de la chaîne logistique des pièces de rechange .....	6
I. La chaîne logistique .....	7
II. L’émergence du service et de la notion de qualité de service .....	13
III. Impact sur la configuration du service après-vente et la chaîne logistique des pièces de rechange.....	17
Chapitre 2 : Chaîne logistique des pièces de rechange de GEHC .....	25
I. Le conglomerat GE, sa branche GEHC et son service après-vente .....	26
II. La chaîne logistique des pièces de rechange chez GEHC.....	32
Chapitre 3 : Positionnement scientifique et objectifs des travaux .....	41
I. Positionnement scientifique.....	42
II. Analyse de la littérature et objectifs des travaux.....	50
 Deuxième partie Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks.....	 57
Chapitre 4 : Processus de prévision de la demande en pièces de rechange .....	58
I. Analyse du processus de prévision en pièces de rechange.....	60
II. Propositions d'améliorations du processus de prévision en pièces de rechange ...	70
III. Expérimentation du nouveau processus sur données réelles .....	83
Chapitre 5 : Processus de gestion de stocks basée sur des prévisions .....	95
I. Processus classique de gestion de stocks en pièces de rechange .....	96
II. Impact des classifications des pièces sur les performances en gestion des stocks	104

<b>Chapitre 6 : Processus intégré de sélection des méthodes de prévision sur des critères de gestion de stocks .....</b>	<b>113</b>
<b>I. Approche intégrée de sélection des méthodes de prévision.....</b>	<b>114</b>
<b>II. Proposition d'une approche de sélection des méthodes de prévision par une analyse multicritères .....</b>	<b>117</b>
<b>III. Comparaison entre les approches de sélection des méthodes de prévision .....</b>	<b>124</b>
<b>IV. Plan d'expérience et résultats .....</b>	<b>126</b>
<b>Chapitre 7 : Processus de gestion des stocks à différents niveaux de service.....</b>	<b>133</b>
<b>I. Positionnement et classification des travaux de littérature.....</b>	<b>134</b>
<b>II. Gestion des stocks à différents niveaux de service sur des prévisions .....</b>	<b>144</b>
<b>III. Plan d'expérience et résultats .....</b>	<b>148</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>159</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>163</b>

# Liste des tableaux

Tableau 1: Gestion des flux des pièces de rechange à GPRS .....	34
Tableau 2: Solutions et attentes de GPRS en gestion des stocks.....	38
Tableau 3: Opportunités de développement en problématiques de prévision et de gestion des stocks .....	52
Tableau 4: Intersections entre les différents positionnements des travaux .....	53
Tableau 5: Mesures de précision classiques des méthodes de prévision .....	68
Tableau 6: Résumé des classifications pour la prévision en pièces de rechange .....	74
Tableau 7: notation commune aux deux méthodes d'hybridation .....	75
Tableau 8: Notation pour la méthode d'hybridation 1 .....	75
Tableau 9: Notation pour la méthode d'hybridation 2 .....	76
Tableau 10: Données d'entrée pour l'illustration 1.....	78
Tableau 11: Résultat obtenu par la méthode hybride 1 .....	78
Tableau 12: Données d'entrée pour l'illustration 2.....	79
Tableau 13: résultat obtenu par la méthode d'hybridation 2 .....	79
Tableau 14: Ecart en variabilité et en ADI selon le niveau de maturité de la pièce .....	85
Tableau 15: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces stables .....	87
Tableau 16: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces sporadiques .....	87
Tableau 17: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces erratiques .....	87
Tableau 18: Résumé de la sélection en fonction du temps d'approvisionnement par catégorie de demande ....	88
Tableau 19: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces stables .....	88
Tableau 20: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces sporadiques .....	89
Tableau 21: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces erratiques.....	89
Tableau 22: Résumé de la sélection en fonction de la priorité stock/service par catégorie de demande.....	89
Tableau 23: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces en introduction .....	90
Tableau 24: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces en maturité.....	90
Tableau 25: Sélection en fonction d temps d'approvisionnement pour des pièces en fin de vie .....	90
Tableau 26: Résumé de la sélection en fonction du temps d'approvisionnement par niveau de maturité.....	90
Tableau 27: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en introduction .....	91
Tableau 28: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en maturité.....	91
Tableau 29: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en fin de vie .....	91
Tableau 30: Sélection en fonction des priorités stock/service par catégorie de niveau de maturité des pièces .....	92
Tableau 31: Sélection de la méthode hybride 1 par catégorie de demande .....	92
Tableau 32: Sélection de la méthode hybride 1 par niveau de maturité des pièces .....	92
Tableau 33: Sélection de la méthode hybride 2 par catégorie de demande .....	93
Tableau 34: Sélection de la méthode hybride 2 par niveau de maturité des pièces .....	93
Tableau 35: Types de méthodes de gestion des stocks .....	100
Tableau 36: Notations pour le tableau 37 .....	101
Tableau 37: Comparaison entre politiques de gestion des stocks sur prévisions et ceux sur demandes [141]	101

Tableau 38: Notations pour l'évaluation de performance du modèle de gestion de stocks .....	102
Tableau 39: Exemple de matrice de niveau service par classification de gestion des stocks.....	104
Tableau 40: Notations communes pour les méthodes MCDA .....	118
Tableau 41: Exemple d'un tableau d'évaluation avec la méthode Electre III.....	121
Tableau 42: Matrices de concordances de la Méthode Electre III .....	121
Tableau 43: Matrices de discordances de la Méthode Electre III .....	122
Tableau 44: Matrice de concordance finale.....	122
Tableau 45: Matrice de sur classement.....	122
Tableau 46: Comparaison entre les 4 approches de sélection des méthodes de prévision.....	124
Tableau 47: Comparaison des approches proposées avec les approches d'interaction de la littérature .....	125
Tableau 48: Le poids utilisés pour les scénarios des tests .....	126
Tableau 49: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces stables .....	127
Tableau 50: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces sporadiques .....	127
Tableau 51: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces erratiques.....	127
Tableau 52: Résumé des comparaisons entre les approches de sélection par catégorie de demande.....	128
Tableau 53: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en introduction.....	128
Tableau 54: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en maturité .....	129
Tableau 55: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en fin de vie .....	129
Tableau 56: Résumé des comparaisons entre les approches de sélection par niveau de maturité des pièces ..	129
Tableau 57: Classification des articles de gestion différenciée des stocks .....	138
Tableau 58: Comparaison entre les articles de différenciation en évaluation de performance .....	141
Tableau 59: Notations pour les modèles de gestion de stocks à différents niveaux de service .....	144
Tableau 60: Calcul des seuils des politiques de différenciation sur des prévisions .....	146
Tableau 61: Les 3 scénarios de niveau de service théorique utilisé .....	149
Tableau 62: Impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle par catégorie de demande.....	149
Tableau 63: Impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle par niveau de maturité des pièces .....	150

# Liste des figures

Figure 1: Les types de chaînes logistiques [4].....	8
Figure 2: Niveau stratégique du modèle SCOR d'une chaîne logistique [10].....	10
Figure 3: Niveau tactique du modèle SCOR d'une chaîne logistique [11].....	10
Figure 4: Les principaux types de services [33] .....	15
Figure 5: Les niveaux d'engagement sur un service [24] .....	16
Figure 6: La qualité de service [35].....	16
Figure 7: Organisation traditionnelle de maintenance [43] .....	19
Figure 8: Organisation de maintenance avec un service support [44] .....	19
Figure 9: Flux des pièces de rechange dans le cas d'une gestion décentralisée .....	20
Figure 10: Flux des pièces de rechange dans le cas d'une gestion centralisée .....	21
Figure 11: Positionnement de la chaîne logistique des pièces de rechange .....	21
Figure 12: Les divisions de General Electric [55] .....	27
Figure 13: Cycle de vie d'un produit GEHC .....	30
Figure 14: Processus de résolution d'une panne à GPRS .....	32
Figure 15: Catégorisation de la demande en pièces de rechanges [83] .....	61
Figure 16: Processus classique de prévision en pièces de rechange.....	68
Figure 17: Nouvelle étape du pré-processing .....	70
Figure 18: Approche classique d'évaluation de la performance des méthodes de prévision .....	80
Figure 19: Evolution de la variation de la demande en fonction du niveau de maturité des pièces .....	84
Figure 20: Evolution de l'intervalle moyen de la demande en fonction du niveau de maturité.....	85
Figure 21: Processus général de gestion des stocks sur des prévisions .....	103
Figure 22: Processus testé de gestion de stocks sur des prévisions .....	105
Figures 23: Comparaison du niveau de service par catégorie de demande en fonction du temps d'approvisionnement .....	106
Figure 24: Comparaison du niveau de stock par catégorie de demande en fonction du temps d'approvisionnement .....	107
Figure 25: comparaison du niveau de service par niveau maturité de niveau de maturité de pièces en fonction du temps d'approvisionnement.....	108
Figure 26: comparaison du niveau de stock par niveau de maturité de niveau de maturité de pièces pour différents scénarios de temps d'approvisionnement .....	110
Figure 27: Exemple de définition de niveau de service théorique .....	111
Figure 28: Approche d'évaluation intégrée .....	116
Figure 29: Comparaison en coûts entre les politiques de différenciation [162].....	140
Figure 30: Evolution du niveau de service des deux classes [162] .....	140
Figure 31: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces stables .....	151
Figure 32: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces sporadiques .....	152
Figure 33: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces erratiques .....	153
Figure 34: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en introduction.....	154
Figure 35: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en maturité .....	155
Figure 36: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en fin de vie .....	156

# Introduction générale

Dans un contexte économique marqué par une concurrence accrue, le besoin de l'organisation, de la gestion et de l'optimisation des processus industriels est primordial pour assurer la bonne performance des entreprises à travers l'amélioration du triptyque coût, qualité et service.

L'optimisation d'un processus industriel passe par l'optimisation d'une de ses fonctions clés la chaîne logistique. Ce mot, logistique, dont l'étymologie grecque est synonyme de raisonnement logique, ou de calcul mathématique, a été utilisé pour la première fois dans le vocabulaire militaire pour désigner la coordination des activités de transport, de ravitaillement et de communication dans un campement de guerre. Aujourd'hui, la définition de la chaîne logistique est plus large, elle couvre l'ensemble des activités permettant le transfert et la transformation des produits ou services depuis le premier fournisseur jusqu'au client final.

Le service de maintenance, un des services proposés par l'entreprise à ses clients, désigne l'ensemble des activités qui permettent de maintenir et rétablir le produit en bon état de fonctionnement. Ces opérations font souvent appel à un remplacement des pièces défectueuses, d'où le besoin d'un stock en pièces de rechange et donc d'un processus de gestion des stocks.

Traditionnellement, la gestion de ces stocks se fait par les techniciens de maintenance. Cependant, cette configuration ne permet pas un partage des stocks et une coordination des activités logistiques, ainsi elle est désormais remplacée par une gestion centralisée de la chaîne logistique des pièces de rechange qui permet non seulement un rationnement des stocks, mais aussi une supervision et une mutualisation des flux.

Etant à l'intersection entre maintenance et logistique, la chaîne logistique des pièces de rechange représente des caractéristiques différenciatrices par rapport au cas classique, ce qui justifie l'intérêt de son traitement par une littérature indépendante. Parmi ces caractéristiques on peut distinguer l'aspect faible et erratique de la demande. Ce profil difficilement estimable de la demande a une influence importante sur les processus de prévision et de gestion des stocks et par suite sur les principaux indicateurs de performance de la chaîne logistique : les niveaux de service et d'inventaire. Par ailleurs, les priorités entre ces indicateurs diffèrent en fonction de la segmentation des pièces et de celle des clients de la chaîne, d'où le besoin de la considération de cette différenciation dans le dimensionnement des stocks.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un projet de thèse CIFRE, il a été par conséquent accompagné d'une application industrielle de ses résultats. Il s'agit de la chaîne logistique des pièces de rechange de GE Healthcare. Cette entreprise de produits et services en systèmes

médicaux, possède un département dédié à la gestion de la chaîne logistique globale des pièces de rechange. L'objectif serait d'améliorer ses processus internes de gestion de stocks afin de mieux répondre à une demande très distribuée géographiquement, dans le cas d'un portefeuille très large en références et un comportement de techniciens de maintenance faiblement maîtrisé, ce qui exige l'utilisation d'une approche basée sur l'historique de la demande plutôt qu'une approche fiabiliste.

Ainsi, cette thèse analysera les deux processus de prévision et de gestion de stocks de la littérature, avant de proposer des améliorations à leurs étapes, au vue d'effectuer une intégration entre ces deux processus pour établir de nouvelles approches de sélection des méthodes de prévision. Finalement, elle traitera le cas de la différenciation client dans la gestion des stocks en pièces de rechange. Dans chaque phase de cette thèse, les processus proposés seront analysés en utilisant un plan d'expérience de données réelles de GEHC et les résultats seront comparés en fonction de la segmentation de profil de la demande et celle du niveau de maturité des pièces.

Ce rapport sera ainsi organisé comme suit :

Dans la première partie : Un positionnement des travaux sera effectué, à travers la contextualisation de la chaîne logistique des pièces de rechange (chapitre 1), la présentation du cas d'application industrielle (chapitre 2) et la définition des objectifs de la thèse (chapitre3).

Dans la deuxième partie : Une présentation des travaux de la thèse sera effectuée, sur la base d'une conceptualisation et une analyse critique des processus classiques de la littérature, puis par des propositions d'améliorations de ces processus afin de mieux considérer les objectifs de gestion de stocks et les caractéristiques des pièces de rechange. Ceci sera organisé en 4 processus, le processus de prévision de la demande (chapitre 4), le processus de gestion des stocks sur des prévisions (chapitre 5), le processus intégré de prévision et de gestion des stocks (chapitre 6) et finalement le processus de gestion de stocks dans le cas d'une différenciation client (chapitre 7).





# Première partie

## Positionnement et objectifs des travaux

**Chapitre 1 : Positionnement de la chaîne logistique des pièces de rechanges**

**Chapitre 2 : Chaîne logistique des pièces de rechange de GEHC, son organisation, ses défis et ses attentes**

**Chapitre 3 : Positionnement scientifique et objectifs des travaux**

# **Chapitre 1 : Positionnement de la chaîne logistique des pièces de rechange**

## **I. La chaîne logistique**

- a. La définition de la chaîne logistique
- b. La modélisation de la chaîne logistique
- c. La gestion et la performance de la chaîne logistique
- d. La différenciation en chaîne logistique

## **II. L'émergence du service après-vente**

- a. L'émergence du service après-vente
- b. La notion de qualité de service

## **III. l'impact sur la configuration du service après-vente et la chaîne logistique des pièces de rechange**

- a. Le service de maintenance
- b. Impact de l'émergence du service sur l'organisation du service de la maintenance et la chaîne logistique des pièces de rechanges

## Introduction

La chaîne logistique de pièces de rechange est une chaîne logistique de service après-vente, elle est donc à l'intersection entre deux organisations différentes, celle de la chaîne logistique et celle du service après-vente de maintenance. Ainsi, ce chapitre vise dans un premier temps de définir ces deux contextes et leurs caractéristiques principales.

Dans un deuxième temps il expliquera le besoin de renforcement de l'organisation de maintenance et la chaîne logistique des pièces de rechange afin de prendre en compte les défis accompagnants l'émergence du service après-vente.

### I. La chaîne logistique

#### a. La définition de la chaîne logistique

La chaîne logistique représente l'ensemble des activités et des flux physiques, informationnels et financiers permettant le transfert du bien ou du service, depuis le point de départ (fournisseur), jusqu'au point d'arrivée (client final). Elle couvre aussi les activités et les flux inverses entre le client final et le fournisseur. C'est le processus intégrant les trois fonctions : approvisionnement, transformation et distribution des biens ou des services.

La référence [1] définit la chaîne logistique comme : « *un réseau d'organisations qui sont interconnectées, à travers des liens amonts et aval, par différents processus et activités d'entreprises qui permettent la création de valeur sous forme de produits ou de services pour les clients* ».

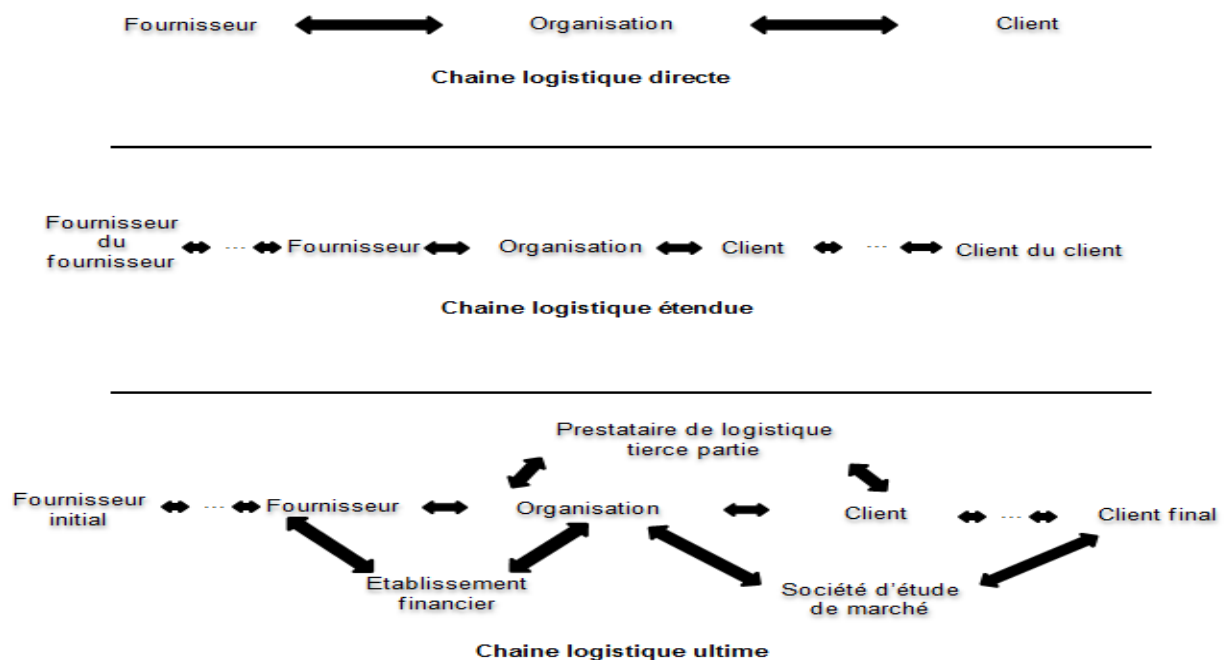
La référence [2] explicite les acteurs de cette chaîne dans sa définition : « *La chaîne logistique est un réseau de fournisseurs, d'entreprises, de dépôts, de centres de distribution et de détaillants, aux travers desquels les matières premières sont acquises, transformées et délivrées aux clients* ».

La chaîne logistique ne se limite donc pas à la seule fonction logistique, comme le précise la référence [3] « *c'est plus qu'un nouveau nom de la logistique...elle ne se limite pas à des acteurs internes de l'organisation* », c'est tout un réseau qui lie principalement :

- ✓ Les fournisseurs de différents niveaux, internes ou externes à l'entreprise : de matière première, de produits semi-finis, de produits finis, de pièces de rechange, ou de services...
- ✓ Les usines de création de valeur : de production, d'assemblage, ou de réparation ou toute unité de transformation du bien ou du service.

- ✓ Les entrepôts de stockage de différents niveaux, de centralisation et de décentralisation du stock, les centres de distributions, les plateformes cross-dock, les magasins des détaillants, ou de ventes ou de pièces de rechange.
- ✓ Les clients : consommateur d'un bien ou usager d'un service, client final ou intermédiaire.

Le nombre d'acteurs couverts par la chaîne logistique considérée/étudiée, dépend du périmètre de sa définition, la figure 1 [4] représente le réseau des acteurs selon trois niveaux de complexité de la chaîne : une chaîne directe, une chaîne étendue et une chaîne ultime.



**Figure 1: Les types de chaînes logistiques [4]**

Différents types de flux circulent entre les acteurs de la chaîne logistique :

- ✓ Les flux amont : qui circulent entre le fournisseur et l'organisation principale.
- ✓ Les flux avals : qui circulent entre l'organisation principale et ses clients.
- ✓ Les flux inverses : les flux des retours et de recyclage, qui circulent entre les clients et l'organisation principale ou directement vers les fournisseurs, ou vers des acteurs de recyclage ou de réparation.

Ces flux peuvent être de différentes natures :

- ✓ Les flux physiques : qui représentent les matières premières, les produits, les outils, les services...qui transitent entre les différents acteurs de la chaîne ou qui sont stockés chez un ou plusieurs acteurs de la chaîne.
- ✓ Les flux informationnels : qui représentent l'ensemble des informations et des données que possèdent ou partagent les différents acteurs de la chaîne, essentiellement les informations sur les commandes, les délais, les coûts, les demandes des clients.... [5].
- ✓ Les flux financiers : qui représentent l'ensemble des transactions financières entre les acteurs. Incluant la trésorerie, les paiements, les actifs... [6].

Compte tenu de la multitude des acteurs, des flux et des processus de la chaîne logistique constatée dans la réalité, une étape de modélisation devient primordiale pour toute analyse d'une chaîne logistique.

### **b. La modélisation de la chaîne logistique**

La modélisation de la chaîne logistique est une représentation des processus de la totalité ou une partie d'une chaîne en fonction du périmètre de modélisation défini qui peut être réelle ou virtuelle, par un ensemble de techniques, de langages.

Le passage par une modélisation a pour objectif la simplification d'une réalité souvent complexe de la chaîne logistique, l'évaluation de ses performances, une conception d'une nouvelle chaîne, une aide à la décision dans ses différents niveaux stratégique, tactique ou opérationnel....

Les modèles de la chaîne logistiques peuvent être :

- ✓ Conceptuels : Représentations qualitatives, qui ont comme objectif la formalisation des processus afin d'organiser et conceptualiser leurs contenus et leurs liens [7].
- ✓ Analytiques: Représentations quantitatives, par formulation mathématiques, qui ont comme objectifs l'optimisation et l'aide à la décision au niveau des différents processus de ces modèles [8].
- ✓ De simulation : Qui sont des représentations qui permettent la prise en compte de l'aspect dynamique de la chaîne logistique et la réalisation de différents scénarios [9].

Parmi les modèles conceptuels les plus standardisés de la chaîne logistique on retrouve le modèle SCOR [10] qui représente les processus clés d'une chaîne logistique en 3 niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.

Le niveau stratégique repose principalement sur 5 processus de gestion (figure 2) : planifier, s'approvisionner, fabriquer, livrer, retourner. Ces processus concernent les différents acteurs de la chaîne logistique : l'organisation principale, son fournisseur (le fournisseur du fournisseur...), son client (le client du client...).

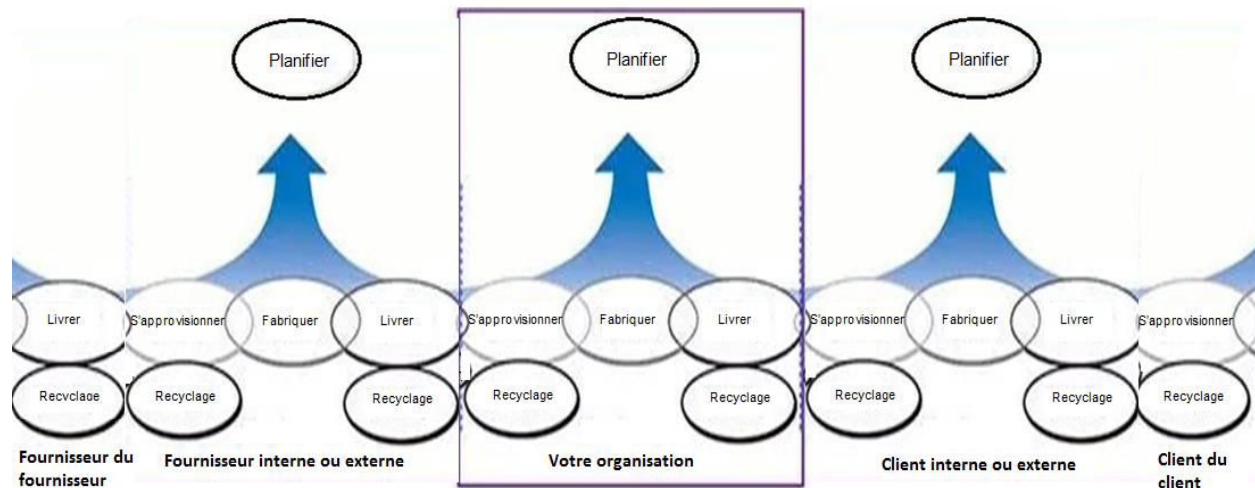


Figure 2: Niveau stratégique du modèle SCOR d'une chaîne logistique [10]

Le niveau tactique divise les 5 processus du niveau stratégique en sous-étapes (figure 3). Celui de la planification est composé de la planification de la chaîne logistique, des approvisionnements, de la fabrication, de la livraison, des retours [11].

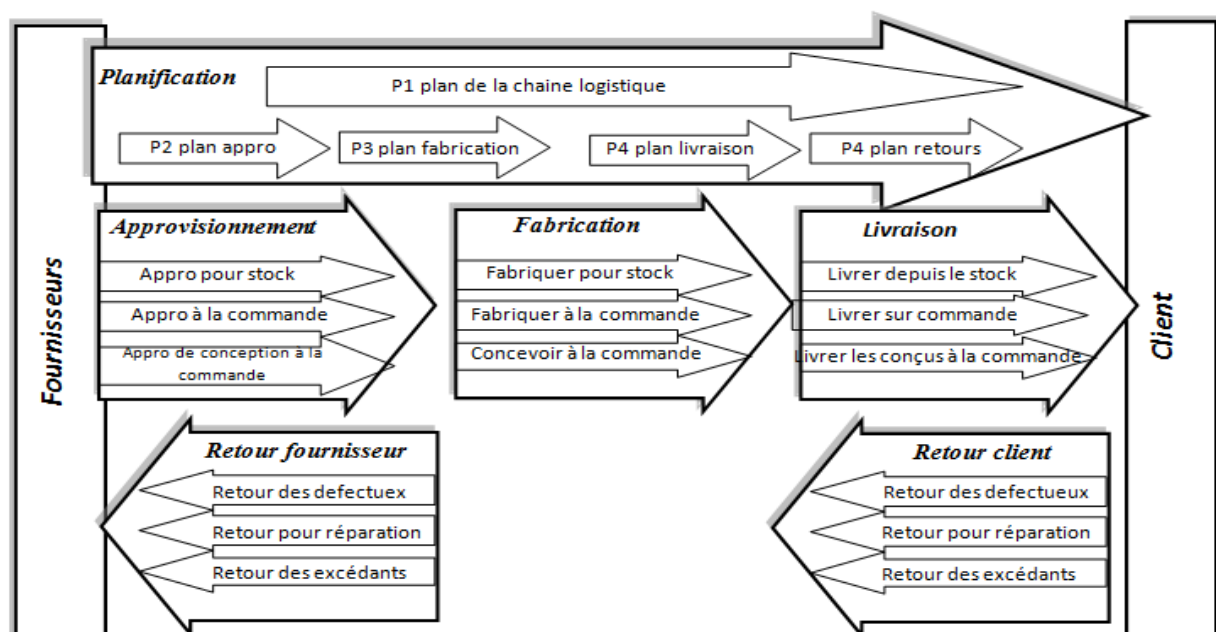


Figure 3: Niveau tactique du modèle SCOR d'une chaîne logistique [11]

Finalement, le niveau opérationnel associe des activités précises de l'entreprise à ces sous-processus [11].

La construction d'un modèle de chaîne logistique, comme SCOR, a pour objectif la détermination par la suite d'un ensemble de règles de gestion de la chaîne logistique et d'indicateurs de performances pour les différents processus.

### **c. La gestion et les indicateurs de performance de la chaîne logistique**

Si les définitions de la chaîne logistique dans la littérature sont souvent proches, ceux de la gestion de la chaîne logistique « Supply Chain Management (SCM) » diffèrent en fonction de l'approche adoptée par chaque article [4].

On peut distinguer, d'une part une approche philosophique, qui représente le SCM comme paradigme qui favorise : une coopération entre les acteurs de la chaîne, une stratégie unifiée pour renforcer la position sur le marché, ainsi qu'une orientation client de la chaîne, « *la gestion de la chaîne logistique est une philosophie intégrative pour gérer la totalité des flux d'une chaîne de distribution depuis le fournisseur jusqu'au client final* » [12].

D'autre part une approche processus, qui vise à identifier et analyser les processus concernés par cette gestion en fixant leurs objectifs, « *la gestion de la chaîne logistique est la synchronisation des exigences du client final, avec le flux de matériels du fournisseur afin de réaliser un équilibre entre, ce qui est souvent vu comme des objectifs contradictoires, un niveau de service client important, un niveau d'inventaire et des coûts faibles* » [13].

Elle consiste donc en l'établissement de règles de gestion et de pilotage qui dépendent des objectifs classiques de la chaîne logistique.

Parmi ces objectifs, on distingue celui de la coordination et la coopération entre les différents acteurs de cette chaîne à travers une gestion efficiente de ses différentes étapes, par synchronisation de flux physiques, informationnels et financiers avec les besoins et les exigences des clients finaux [14].

L'objectif final de la chaîne logistique consiste en la mise à disposition du client le bon produit/service avec la bonne quantité, au bon endroit, au bon moment, tout en réduisant les différents coûts relatifs à cette chaîne, en préservant la qualité du bien ou du service lors de son transport et en respectant les exigences environnementales [15].

Il s'agit donc d'améliorer les différents types d'indicateurs de performances : de coût, de qualité de service, de qualité du produit (lors des opérations logistiques par exemple...) et les indicateurs environnementaux. Par soucis de cohérence avec la problématique de la thèse, nous détaillons dans cette partie seulement les deux premiers types d'indicateurs.



### ✓ **Les coûts de la chaîne logistiques**

Différents coûts sont associés à la gestion de la chaîne logistique, parmi ceux-ci on peut citer:

- Les coûts d'acquisition : couvrent les coûts d'achat des produits du fournisseur.
- Les coûts d'approvisionnement : couvrent les coûts de passation de commande, de livraison.
- Les coûts de stockage : couvrent les coûts relatifs aux frais d'immobilisation et les opérations de stockage.
- Les coûts de distribution : couvrent les coûts d'acheminement des produits vers le client intermédiaire ou final, principalement les coûts de préparation des commandes et de transports.
- Les coûts de rupture de stock : couvrent les coûts relatifs aux non satisfactions des commandes clients, qui peuvent être des coûts directs, comme des pénalités, ou des coûts indirects, comme le non renouvellement de contrats.

### ✓ **La qualité de service en chaîne logistique**

La qualité de service en chaîne logistique est souvent associée à celle du client final. Cependant elle peut concerner tous les acteurs de la chaîne qui sont en aval de l'organisation qui mesure la qualité de son service. Cette mesure peut être qualitative ou quantitative.

- Les mesures qualitatives : qui se font par des enquêtes de satisfaction du client par rapport aux exigences de livraison, de flexibilité du fournisseur, de communication et partage de données, par le nombre de plaintes des clients ou de litiges entre acteurs [16].
- Les mesures quantitatives : Souvent relatives aux livraisons, et qui peuvent être en quantité ou en temps.
  - Les mesures en quantité peuvent représenter le nombre de commandes non-satisfaites, ou en attentes.
  - Les mesures en temps dont on peut citer : Le temps de livraison à la date de commande, le temps de livraison à la date d'engagement, le délai d'approvisionnement contractuel [17].

### **d. Différenciations en chaîne logistique**

La gestion de la chaîne logistique à travers le pilotage de ses processus et fonctions nécessite la définition d'une orientation de la gestion au niveau stratégique, qui peut se décliner sur les niveaux les plus bas, tactique et opérationnel, jusqu'à la traduction de cette stratégie en un plan d'actions récurrentes à exécuter, « *une entreprise n'a pas d'orientation de sa chaîne*

*logistique si elle ne voit son implication stratégique et systémique que dans une seule direction» [4].*

Par ailleurs, dans un contexte de concurrence accrue, d'évolution des exigences des clients, de développement des technologies de conception et de production, les entreprises personnalisent de plus en plus leurs produits et proposent ainsi une importante gamme de produits. En effet, la période marquée par une tendance de standardisation de l'offre souvent symbolisée par l'offre Ford T de Ford, a été suivie par une période avec une tendance de segmentation de l'offre [18].

L'importance de la gamme de produits en « largeur » (types de produits) et en « profondeur » (options du même type de produit) exige aux entreprises d'avoir une politique produit différenciée (D1 : Différenciation 1), ainsi la chaîne logistique, une des fonctions de l'entreprise, se doit de s'aligner avec cette politique et cette différenciation.

Or, dans la réalité, la chaîne logistique trouve de la difficulté à suivre cette différenciation produit comme le précise la référence [19], *« La cause principale des problèmes qui tourmentent la chaîne logistique est la non-concordance entre le type du produit et le type de la chaîne logistique ».*

Pour les mêmes raisons de la diversification du produit, la diversification du contrat client est recommandée pour couvrir une large clientèle, principalement par la différenciation du niveau de service proposé (D2 : Différenciation 2). Ainsi, dans ce cas, la chaîne logistique se doit de prendre en compte cette différenciation contrat en plus de celle du produit.

Pour répondre à ces exigences de différenciation, l'orientation de la chaîne logistique (SCO) vise à définir des stratégies de chaîne logistique par catégories [20] : on distingue une stratégie réactive adaptée par exemple aux produits « innovants », d'une stratégie efficiente adaptée par exemple aux produits « fonctionnels ».

La stratégie réactive favorise l'amélioration du niveau de service à travers l'utilisation de solutions agiles. La stratégie efficiente favorise la réduction des coûts à travers l'utilisation de solutions Lean [21].

## **II. L'émergence du service et de la notion de qualité de service**

### **a. L'émergence du service**

Pendant longtemps, la valeur ajoutée de l'activité industrielle consistait essentiellement en produits matériels (biens). Ainsi, l'industrie se focalisait principalement sur des fonctions de conception et de production. En revanche, les services étaient considérés comme de simples

fonctions supports et perçus comme étant des centres de coûts plutôt que sources de bénéfices économiques. « *Traditionnellement la fonction de services après-vente a été vue comme un mal nécessaire en entreprise* ». [22].

Cette orientation produit des entreprises explique les limitations d'investissements matériels, humains et technologiques dans le domaine du service, on parle dans ce cas d'entreprises qui sont « produit-centriques » [23].

C'est avec l'évolution des exigences clients pour les services (période dite de post-industrialisation), et le changement dans les habitudes de la clientèle, fruit de nouvelles stratégies économiques et enjeux concurrentielles des entreprises, que l'orientation service des industries a émergé [24]. « *Le changement est en faveur d'une vue qui considère le service après-vente comme une source d'avantages en compétitivité et une opportunité business* » [25].

Des chiffres peuvent confirmer l'émergence du service au niveau international comme : « *Entre les 25 économies les plus larges au monde, tous sauf un seul pays, sont dominés par les services (plus que 50% du produit intérieur brut)* » [26].

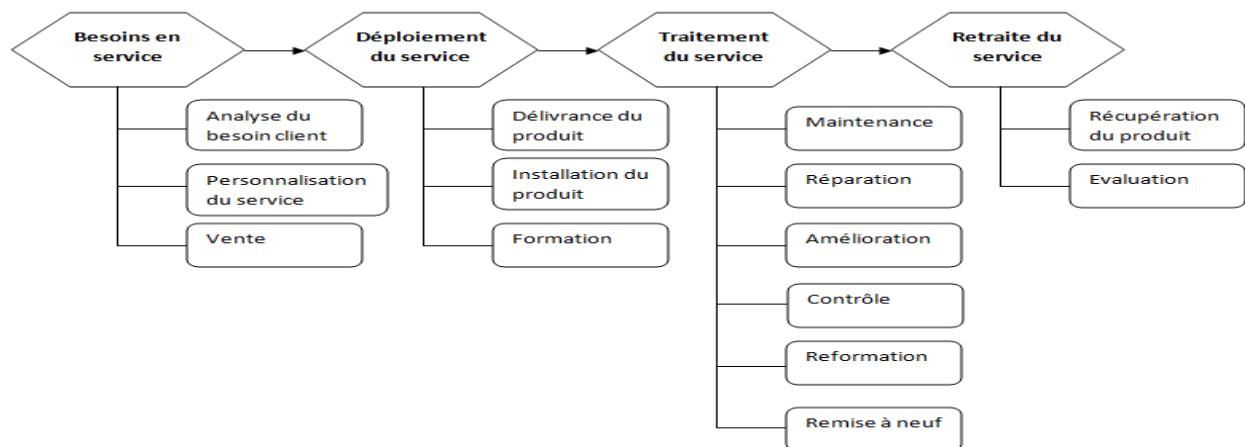
Désormais, certaines industries proposent des contrats pour des prestations de services après-vente avec une tarification indépendante du produit. Ceci aide à mesurer l'importance de l'immatériel chez le consommateur [27].

Par ailleurs, les responsables de marketing, se rendent de plus en plus compte de la similarité des produits sur certains marchés, remplissant pour la majorité leurs fonctions principales. Cette similarité est le résultat d'une concurrence de plus en plus prononcée, un exemple qu'on peut donner ici est le marché de l'automobile. La différence entre ces concurrents est donc souvent au niveau de quelques fonctionnalités optionnelles, parfois peu visibles par le client. Cette fine différence peut en même temps engager des investissements technologiques et matériels très coûteux.

Or la fonction marketing des entreprises, constate que la différence par rapport à la concurrence peut se faire au niveau de la qualité du service offert avec le produit [25]. Le service est devenu un critère de vente de premier rang et un moyen pour l'entreprise d'imprégner son image de marque. De plus, il permet de rester en contact avec la clientèle même après la vente du produit. Il devient donc un bon moyen pour assurer un retour d'expérience sur la qualité du produit et un suivi de l'évolution du besoin de la clientèle. Idéalement, ce retour d'expérience peut participer à l'amélioration de la conception des nouveaux produits [28].

Il est donc clair aujourd'hui, que les services qui accompagnent un produit, peuvent générer des bénéfices plus importants que le produit lui-même : *«Les services sont une source directe et indirecte de profit pour les entreprises, directe parce que ces services sont souvent plus rentables que les produits qu'ils entourent, et indirecte, parce que, attendus par les clients, ils sont inducteurs de la demande des produits et source de différenciation de l'offre de l'entreprise »* [29]. *« Le profit généré par les services après-vente est souvent supérieur à ceux obtenus par les ventes, le marché du service peut être 4 ou 5 fois plus large que le marché du produit »* [30].

Cette montée de l'importance de l'immatériel (service) offert avec le matériel (produit), avec celle des exigences de responsabilité sociétale et environnementale est en plein essor, ce qui a donné naissance à la notion d'usage [31]: Dans ce cas, la responsabilité du produit n'est pas transférée avec le seul acte de vente, mais l'entreprise reste responsable de son produit dans ses différentes phases de vie à travers des services, jusqu'à la reprise et le recyclage du produit. Selon cette configuration, le client devient un usager plutôt qu'un consommateur. Ainsi l'industrialisation du produit est désormais accompagnée d'une industrialisation du service [32], qui peut commencer avant même l'acte de vente. Dans ce cas, comme pour les produits, les services peuvent être aussi représentés en un cycle de vie, Figure 4 [33].



**Figure 4: Les principaux types de services [33]**

On peut remarquer que les services de ce cycle peuvent être immatériels comme la formation de l'utilisateur, ou accompagnés d'un matériel comme la maintenance. Cependant, le lien commun entre ces services, consiste en la création de valeur ajoutée en fournissant une prestation utile à l'utilisateur sans nécessairement faire appel à une transformation technologique sur le matériel.

On parle donc de la servuction, ou la production du service autour d'un produit, par la création de nouveaux services, ainsi que le maintien et l'amélioration des niveaux des services existants.

D'un point de vue engagement sur les résultats de ces services, trois niveaux temporels ont été distingués, figure 5 [24].

1) Engagement sur la mise en œuvre du moyen	2) Engagement sur un résultat immédiat	3) Engagement sur un résultat impliquant la durée
---	--	---

Figure 5: Les niveaux d'engagement sur un service [24]

Ces engagements en service sont mesurés en qualité de service, d'où le besoin de la définition de cette notion.

### b. La notion de qualité de service

La littérature de la qualité de service distingue deux types de qualité dans leur définition [34]:

La *qualité technique* qui est la nature du service délivré au client et sa qualité technologique.

La *qualité fonctionnelle* qui définit comment ce service est délivré, avec quel délai et comment il est perçu par le client (figure 6).

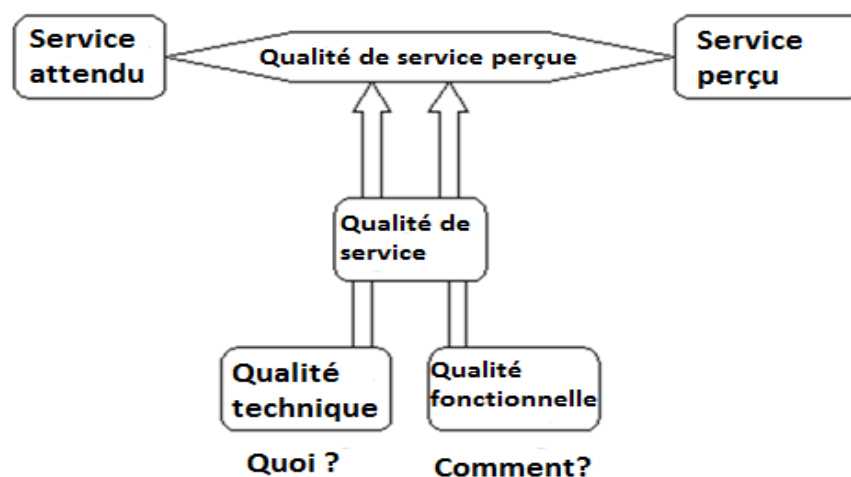


Figure 6: La qualité de service [35]

Cette même littérature, insiste aussi sur la séparation entre deux notions de mesure de la qualité de service: la notion de qualité de service perçue (dite aussi attitude) et la notion de satisfaction client [35]. En effet, le premier est une évaluation sur le long terme qui dépend de la perception du client du service offert, la deuxième est une mesure spécifique et quantitative de la satisfaction [36].

Parmi les mesures utilisées dans la première notion on peut distinguer l'attitude [37]:

$$ATi = g\left(\frac{CSi}{DSi}, ATi - 1\right)$$

L'attitude  $ATi$  à la période  $i$  est une fonction qui lie le rapport entre la satisfaction client  $CS$  et la non-satisfaction du client  $DS$  à la période  $i$ , avec l'attitude à la période  $i-1$ .

Parmi les mesures utilisées dans la seconde notion on peut distinguer les mesures connues sous les noms SERVQUAL ou SERVPERF... [38].

$SQ1 = (Performance - Attentes)$  « SERVQUAL »

$SQ2 = Importance \times (Performance - Attentes)$

$SQ3 = Performance$  « SERVPERF »

$SQ4 = Importance \times Performance$

L'importance est souvent sous forme de poids préalablement défini, qui donne un degré d'importance au service ou à la performance mesurés.

### **III. Impact sur la configuration du service après-vente et la chaîne logistique des pièces de rechange**

#### **a. Le service de la maintenance**

Parmi les services du cycle de vie des services (figure 4), on peut distinguer le service de maintenance ou de réparation. Sa définition d'AFNOR est la suivante [39]: « *La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ».

A travers les termes « maintenir » et « rétablir », cette définition distingue les deux types principaux de la maintenance : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

La maintenance préventive est celle effectuée avant l'occurrence d'une panne, selon des règles temporelles ou de fonctionnement. Son objectif est de maintenir ou améliorer l'état du système en question afin de réduire le taux d'occurrence des pannes ou le risque de dégradation du système. La maintenance corrective est celle effectuée après l'occurrence d'une panne. Son objectif est de remettre le système en bon état de fonctionnement, tout en réduisant le temps de réparation.

L'objectif d'une stratégie générale de gestion de la maintenance dans ses différents types est d'augmenter le temps moyen entre l'occurrence des pannes (MTBF) et de réduire le temps moyen de réparation des pannes (MTTR) à coût de maintenance optimal.

En effet, le temps moyen de réparation (MTTR) qui est souvent une moyenne des temps d'arrêts des systèmes pour maintenance, couvre la période entre la panne du système et sa remise en service, cette période est constituée principalement des temps suivants [40]:

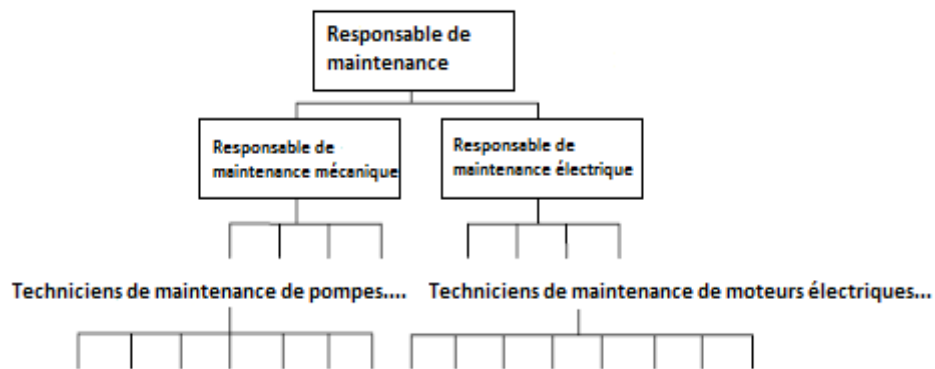
- Le temps de détection de la panne et sa communication.
- Le temps de déplacement du technicien et de diagnostic de la panne.
- **Le temps d'acheminement des pièces de rechange.**
- Le temps 'réel' de réparation.
- Le temps de tests et de remise en service.

Dans une vision plus générique, la notion de sûreté de fonctionnement contient l'ensemble des activités permettant l'amélioration de la disponibilité d'un système. Elle englobe donc, la conception, la maintenabilité, la fiabilité et **la logistique de la maintenance** [41].

#### **b. Impact de l'émergence du service sur l'organisation du service de la maintenance et la chaîne logistique des pièces de rechanges**

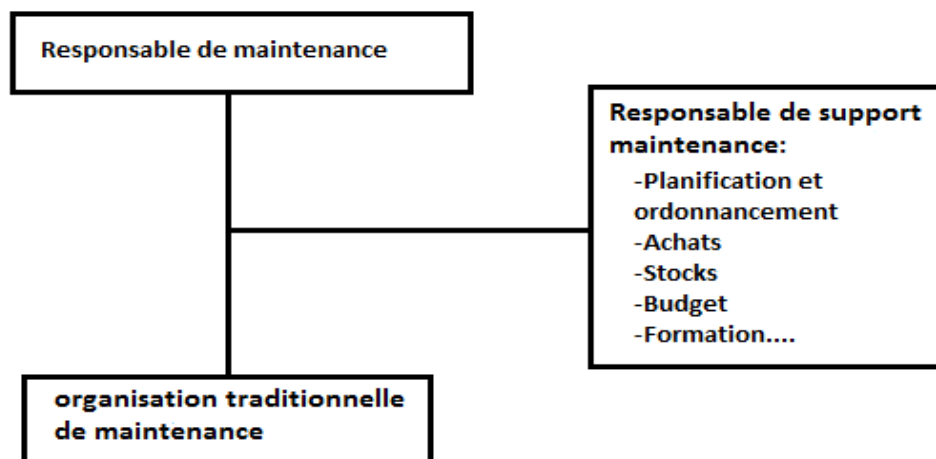
Compte tenu de l'émergence du service après-vente comme importante opportunité de bénéfices économiques pour les industries, de la montée de l'orientation service des entreprises, de l'importance que prend la notion de la qualité de service exprimée en besoins d'amélioration de ce niveau à la fois mesuré et perçu (cf : chapitre 1, section II). Le service de maintenance, se doit d'évoluer d'une maîtrise purement technique vers une organisation de service après-vente avec une réelle orientation service et une interaction renforcée avec le client [42].

Ceci peut se faire en renforçant l'organisation traditionnelle de maintenance [43] (figure 7) à dominance en qualité technique par des unités avec une orientation qualité fonctionnelle. En effet, les industries désirant investir dans le service, ne peuvent pas se limiter à une disposition par types de produits ou par types d'interventions (Mécaniques, électriques...), qui fait que les opérateurs de réparations ou les superviseurs de réparations, s'occupent en même de la planification des interventions et de la disponibilité du 'matériel' de réparation d'une manière annexe, ou comme simples activités de préparation à l'activité principale « La réparation ».



**Figure 7: Organisation traditionnelle de maintenance [43]**

C'est ainsi que des structures plus élargies de l'organisation des activités de maintenance sont adoptées dans certaines entreprises, notamment les plus larges d'entre elles [44]. Elles proposent d'intégrer une fonction support dans la structure de maintenance traditionnelle (figure 8).



**Figure 8: Organisation de maintenance avec un service support [44]**

Cependant, l'organisation du service de maintenance peut tendre complètement vers une structure encore plus large de « service après-vente ». Dans ce cas, le service de maintenance traditionnel devient seulement une activité parmi les trois principales activités de ce service après-vente [45]:

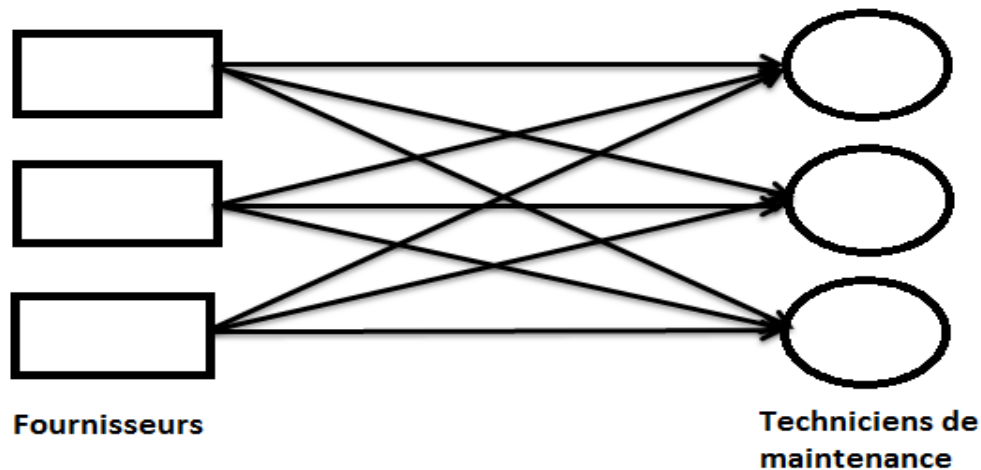
- ✓ Un *service d'assistance technique* en maintenance qui englobe l'ensemble des activités de la structure traditionnelle de maintenance, en incluant les responsabilités des activités d'installations et de reprise des produits.
- ✓ Un *service de gestion des pièces de rechange* qui s'occupe des stocks et des opérations relatives aux pièces de rechange.



- ✓ Un *service support clientèle* qui gère le partage d'information et la communication avec le client ainsi que ses réclamations.

La complexité des systèmes nécessitant une main d'œuvre spécialisée pour la réalisation des interventions ainsi que de l'outillage adapté, la diversité des produits à maintenir engendrant la multiplicité des pièces de rechange spécifiques à chaque produit, la centralisation des organes de gestion de maintenance qui complexifie d'autant la relation avec des clients géographiquement éloignés sont quelques facteurs motivant la recherche d'une organisation efficace dont le maître-mot est l'optimisation de la logistique des pièces de rechange.

Nous proposons maintenant de présenter les organisations traditionnelles de gestion des stocks de pièces de rechange. La première, et encore la plus répandue, est une gestion des pièces de rechange par les techniciens de maintenance [46]. La configuration se fait comme illustrée dans la figure 9.



**Figure 9: Flux des pièces de rechange dans le cas d'une gestion décentralisée**

Cette configuration de gestion décentralisée fait que :

- Les informations ne sont pas ou peu partagées entre les techniciens,
- les stocks ne sont pas partagés,
- les flux logistiques de livraison des techniciens ne sont pas mutualisés et le temps d'approvisionnement est important. Ceci peut engendrer des coûts importants et/ ou une qualité de service faible.

Afin de limiter ces effets, certaines organisations de maintenance ont basculé vers une chaîne logistique des pièces de rechange, avec une gestion centralisée [46], qui :

- Définit la stratégie de gestion de stocks à travers son réseau d'entrepôts,
- récupère les informations de besoins des techniciens de maintenance,

- coordonne les opérations logistiques et assure la relation avec et les fournisseurs et les techniciens de maintenance (figure 10).

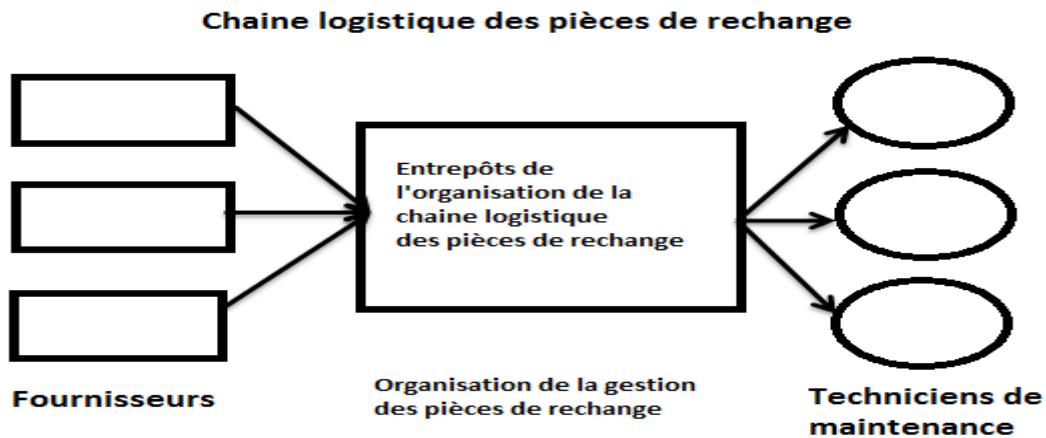


Figure 10: Flux des pièces de rechange dans le cas d'une gestion centralisée

La chaîne logistique des pièces de rechange appelée aussi chaîne logistique de service après-vente [47] ou chaîne logistique des pièces du service [48] est ainsi à l'intersection de deux contextes : celui de la chaîne logistique et celui de la maintenance, figure 11.

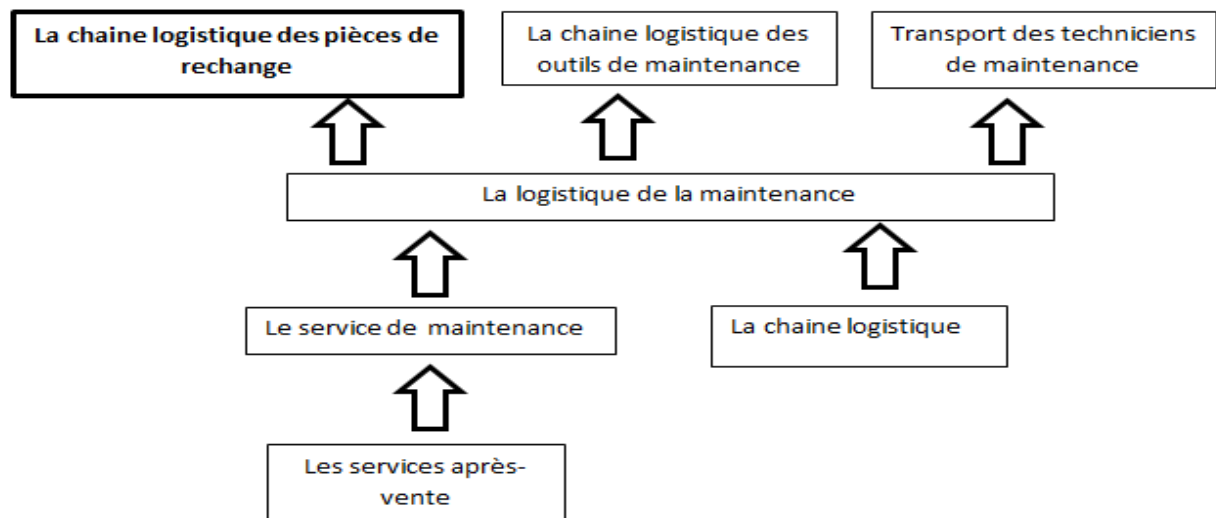


Figure 11: Positionnement de la chaîne logistique des pièces de rechange

La chaîne logistique des pièces de rechange doit donc tenir compte à la fois :

- ✓ Des objectifs de la maintenance, dont la maintenabilité, l'amélioration de la disponibilité des pièces de rechange dans le stock le plus proche du technicien de maintenance.
- ✓ Des objectifs de la chaîne logistique, principalement de réductions de ses coûts, notamment l'optimisation des inventaires.

Bien qu'elle puisse être considérée comme un cas particulier de la chaîne logistique traditionnelle, la chaîne logistique des pièces de rechange présente des caractéristiques différenciatrices justifiant son traitement indépendant, notamment de part de sa double contextualisation.

Des caractéristiques spécifiques des pièces de rechange influencent la conception, les règles de gestion et les processus de la chaîne logistique des pièces de rechange. Les auteurs dans [49] soulignent notamment la criticité technique des pièces, le profil de la demande, la valeur en coûts des pièces mais on peut aussi noter la nature obsoléscente de ces pièces ainsi que, dans certains cas, leur rareté.

Ces deux derniers points, renforcés par le profil spécifique de la demande, permettent de justifier le fait que la particularité de la chaîne logistique des pièces de rechange s'associe principalement à la problématique de gestion des stocks « *La logistique des pièces de rechanges est majoritairement associée à la recherche en gestion des stocks, elle est souvent considérée comme un cas spécial de la gestion des stocks avec des caractéristiques spécifiques* » [49].

La problématique de prévision est une des problématiques critiques dans ce contexte : « *la précision des prévisions de la demande est d'une importance vitale dans la gestion des stocks des pièces de rechange dans les processus industriels* ». [50]

Dans le positionnement spécifique à cette problématique (chapitre 3), nous allons détailler ces caractéristiques qui influencent la gestion des stocks et la prévision de la demande ainsi que les solutions qui ont été proposées dans la littérature.

## **Conclusion**

Aujourd'hui, la chaîne logistique doit faire face à des objectifs souvent contradictoires de service et de coûts et prendre en compte des besoins de différenciation des produits et des clients. L'émergence du service après-vente comme opportunité de bénéfices économiques pour les industries renforce les attentes en qualité de son service et exige l'évolution de son organisation.

C'est ainsi que la chaîne logistique des pièces de rechange, étant à l'intersection entre ces deux contextes, hérite de ces défis. Ses caractéristiques différenciatrices d'une chaîne logistique traditionnelle expliquent la nécessité d'un traitement méthodologique spécifique par rapport à la chaîne logistique traditionnelle notamment en gestion des stocks. Avant de détailler les solutions propres en termes de méthodes de gestion de stocks de pièces de rechange ainsi que des modèles de prévision de la demande associés, nous allons, dans le chapitre suivant, illustrer nos réflexions en décrivant la problématique contextuelle de la thèse chez General Electric Healthcare et la solution qui a été mise en place avant le début de ce programme de recherche.



## **Chapitre 2 : Chaîne logistique des pièces de rechange de GEHC**

### **I. Le conglomérat GE, sa branche GEHC et son service après-vente**

- a. Présentation de General Electric**
- b. Le service après-vente de GE**
- c. Présentation de GEHC**
- d. Le service après-vente de GEHC : le service de maintenance**

### **II. La chaîne logistique des pièces de rechange de GEHC**

- a. Présentation de la chaîne logistique des pièces de rechange de GEHC**
- b. Solutions et attentes en gestion des pièces de rechange à GPRS**

## Introduction

L'entreprise General Electric Healthcare (GEHC), une des branches du conglomérat General Electric (GE), est un des leaders mondiaux dans les ventes et les services des systèmes médicaux.

La réactivité de son service de maintenance constitue un enjeu majeur pour cette entreprise, compte tenu du caractère critique des produits qu'elle commercialise, réactivité qui se traduit par une forte qualité de service. Aussi, la performance de la chaîne logistique des pièces de rechange qui permet d'acheminer les pièces des fournisseurs jusqu'aux techniciens de maintenance s'avère crucial et constitue un axe d'amélioration primordial pour GEHC.

Ainsi ce chapitre vise à présenter l'entreprise GEHC et son service de maintenance avant de se focaliser sur sa chaîne logistique des pièces de rechange : son organisation, ses principales activités, ses solutions en termes de gestion des stocks des pièces de rechange et les principaux défis qu'elle doit surmonter.

### I. Le conglomérat GE, sa branche GEHC et son service après-vente

#### a. Présentation de General Electric

L'origine de General Electric (GE) remonte au célèbre inventeur américain Thomas Edison, qui fonda, en 1878, la Société Edison Electric Light. En 1889, l'ensemble des activités de cette dernière a été rassemblée sous la bannière Edison General Electric Company. En 1892, la fusion de cette société avec Thomson-Houston Electric a donné naissance à General Electric (GE). Ce rapprochement avait comme objectif de réunir les efforts de ses deux anciens concurrents afin de fournir des solutions complètes d'installations électriques.

General Electric est aujourd'hui un conglomérat multinational américain, dont le siège se trouve en Fairfield (Connecticut), et emploie environ 307.000 personnes. Il est actuellement présent dans plus de 170 pays, [51].

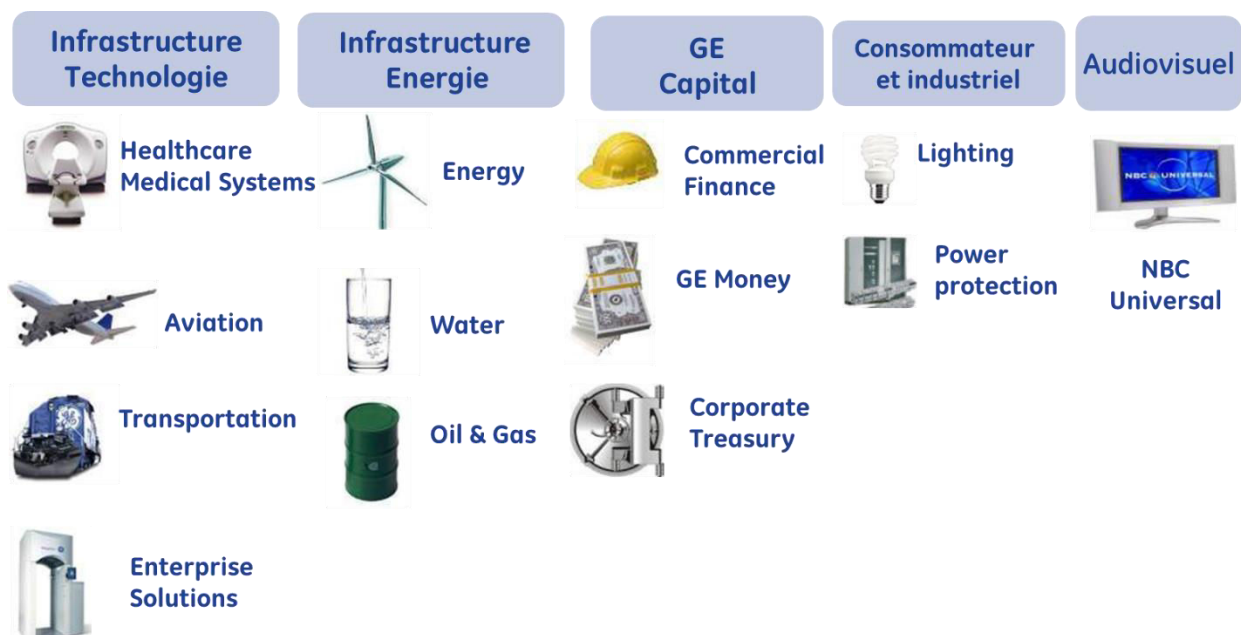
General Electric se distingue également du fait que, parmi les 12 entreprises qui ont historiquement formé le Dow-Jones en 1896, elle soit la dernière encore en activité : en 2014 elle a été classée 27<sup>ème</sup> mondiale en terme de chiffre d'affaire [52], 25<sup>ème</sup> mondiale selon les profits selon les chiffres de 2013 [53], 7<sup>ème</sup> plus grande entreprise mondiale selon le classement du magazine Forbes en 2014 suivant les 4 critères suivants: les revenus, le résultat d'exploitation, l'actif comptable et la valeur boursière [54]. « En 2013, GE a réalisé de forts résultats malgré le climat économique volatile, avec des bénéfices de 16.9\$ billions.

*Le flux de trésorerie industrielle de l'année est resté à un niveau fort avec plus de 17.4\$ Billions ». [51]*

GE opère dans des domaines très variés. Elle est présente :

- dans la technologie (moteurs d'avions, plastiques industriels, imagerie médicale),
- dans l'industrie (éclairage, électroménager, énergie et industrie, moteurs électriques, transports ferroviaires, et routiers, appareillage de contrôle et de distribution)
- dans les services (services financiers, télévision et services informatiques).

GE est organisé en 5 divisions : 2 qui proposent des solutions d'infrastructure, 1 des solutions financières pour les entreprises et les 2 dernières des produits de consommation finale (figure 12), [55].



**Figure 12: Les divisions de General Electric [55]**

Les activités de General Electric, dans son contexte international, reposent sur ses 4 axes: Bâtir, guérir, déplacer et produire de l'énergie dans le monde [56], et des stratégies commerciales basées sur l'excellence environnementale et le développement durable.

En effet, selon GE : « Une stratégie commerciale axée sur l'environnement peut bénéficier à la société tout autant qu'à notre entreprise ». C'est en déclinant ce principe que GE a développé « Ecomagination ». Ecomagination, c'est « l'engagement de GE pour imaginer et bâtir des solutions innovantes qui répondent aux défis environnementaux contemporains, permettant à ses clients, et à la société au sens large, de profiter de ces avancées ». L'investissement dans le développement durable de GE s'est concrétisé au travers d' « Healthymagination », « une stratégie commerciale qui met en œuvre des investissements



*particulièrement innovants pour favoriser un système de santé durable tout en améliorant la croissance de GE* ». Cet engagement fort traduit également la volonté de GE de mettre le développement de systèmes de soin médicaux au centre de sa stratégie globale [56].

GE est aussi un modèle dans les méthodologies de leadership. Jack Welch, ancien CEO de General Electric, nommé meilleur Manager du siècle selon [57], est connu entre autres, pour avoir participé à l'amélioration de la méthodologie Six-Sigma© et pour l'avoir mise au centre de la stratégie d'amélioration des processus de General Electric [58].

GE investit également dans la recherche et le développement avec un ensemble de centres de recherches et laboratoires multidisciplinaires comme le démontre le dépôt de milliers de brevets et l'obtention de deux prix Nobel [59].

### **b. Le Service après-vente à General Electric**

Les prestations de service associées à son offre industriel font de General Electric un acteur incontournable dans le domaine de l'industrie de pointe et lui permettent de s'imposer face à une concurrence toujours plus grande, indépendamment d'un contexte économique même dégradé. Parmi ces prestations de service clés dans la stratégie GE, la maintenance revêt un caractère crucial. En effet, le modèle économique de GE majoritairement orienté B2B se traduit notamment par une offre élargie des produits intégrant de plus en plus d'un suivi et par-delà la garantie de la performance de ces mêmes produits en phase d'exploitation par le biais des différents contrats de maintenance. Cet aspect est par ailleurs renforcé par la nature même des produits de GE qui sont majoritairement d'infrastructure et très souvent de haute-technologie et complexes (Turbines /Moteurs d'avion/Locomotives/Systèmes médicaux/panneaux solaires/ équipements de traitement d'eau et de gaz....). Il est ainsi important de pouvoir transférer la connaissance des produits par le concepteur pour le suivi et l'entretien des produits chez le client.

Fort de ce constat, GE porte un intérêt particulier à l'amélioration de sa stratégie de maintenance, l'optimisation de ses plans de maintenance et la construction d'un ensemble d'équipes et de structures dédiées à cette fonction [60]. Elle a ainsi développé sa branche « solutions entreprises » qui effectue un ensemble de services « après-vente », « *pour répondre à des demandes de maintenance qui augmentent afin d'améliorer la performance et la sécurité des installations* », [60].

Les offres en services après-vente sont principalement les suivantes [60] :

- ✓ Installation
- ✓ Mise en service et démarrage

- ✓ Inspection, maintenance et réparation
- ✓ Solutions de remise à neuf
- ✓ Service d'appels d'urgence
- ✓ Approvisionnement en pièces de rechange
- ✓ Location d'équipement
- ✓ Formation et support client.

### **c. L'entreprise General Electric Healthcare**

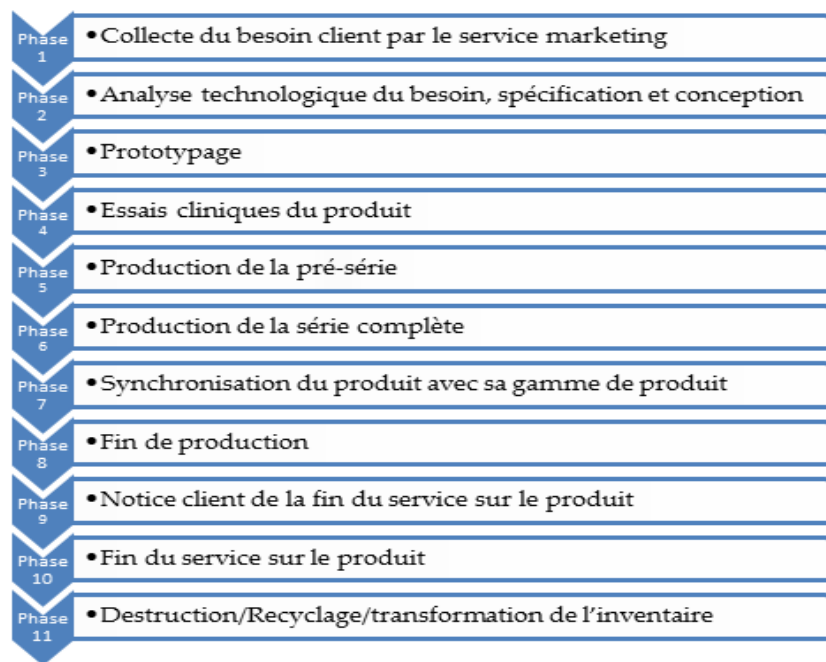
Parmi les divisions du conglomérat GE, on retrouve la branche médicale « General Electric Healthcare » (GEHC), un leader mondial de la conception et de la fabrication des équipements médicaux et notamment d'imagerie médicale.

GEHC dont le siège est basé à Buckinghamshire en Angleterre, emploie plus de 46.000 personnes. Son histoire remonte à la création de la Victor Electric Company en 1893, qui a investi dans le marché du rayonnement-X avant d'être achetée par General Electric en 1920, [61]. Depuis, GEHC a fait un ensemble d'acquisitions d'entreprises de systèmes médicaux et n'a cessé de se développer pour devenir un acteur incontournable de ce marché.

Les activités de GEHC s'organise autour de trois axes : le premier est dit horizontal (ou encore fonctionnel) est intègre les activités de Marketing, Ventes, Conception, Production, Supply chain, Services et Finances.

Un second est dit vertical et s'organise suivant les différents types de modalités de systèmes médicaux et de gammes de produits [62]. La troisième est régional (Amériques/Europe/Asie....).

Le cycle de vie d'un produit chez GEHC suit souvent les principales phases classiques des produits d'une entreprise comme l'illustre la figure13 :



**Figure 13: Cycle de vie d'un produit GEHC**

Il convient de préciser que le cycle de vie des services après-vente commence par la conception de ces services dès la phase 1 ; cependant son déploiement ne commence qu'à partir de la phase 5 pour accompagner la distribution de la pré-série, il se termine avec le service de recyclage du produit.

#### **d. Le service après-vente de GEHC : service de maintenance**

GEHC dispose de trois principales fonctions de services après-vente :

- ✓ La *fonction de mise à disposition* qui s'occupe de l'ensemble des activités depuis l'acte de vente (la passation de commande) jusqu'à la mise en service du produit. Ceci englobe la chaîne logistique de distribution des produits, la préparation de la salle qui va accueillir le produit, l'installation du produit et enfin la mise en service du produit.
- ✓ La *fonction de service de maintenance* (services lors de l'utilisation) qui s'occupe de l'ensemble de services de réparations et d'accompagnement des clients lors de l'utilisation du produit.
- ✓ La *fonction de recyclage* qui s'occupe de l'ensemble des activités de recyclage et de destruction des produits.

On peut constater que cette disposition rejoint celle du cycle de vie de services du chapitre précédent (cf : figure 4), notamment les trois étapes de déploiement du service, traitement du service et retrait du service. L'étape manquante d'identification du besoin en service se fait

d'une manière continue et transversale au niveau des équipes stratégiques de ses trois départements.

Par soucis d'alignement avec le sujet de thèse et son environnement d'application, nous nous focaliserons sur le service de maintenance (Traitement du service).

GEHC constate grâce à sa communication continue avec ses clients, qu'aujourd'hui un client (une structure médicale) peut avoir autant d'exigences en termes de qualité de produit qu'en termes de qualité de son service de maintenance. En effet, l'indisponibilité de l'équipement médical peut avoir des conséquences beaucoup plus graves que pour d'autres types d'équipement. Cette indisponibilité peut engendrer d'importants retards par rapport au plan initial des soins et de diagnostics dans une structure médicale et donc peut avoir des conséquences importantes sur la planification des soins dans les hôpitaux.

Aussi, GEHC a décidé de se doter d'un *département de prestations services orientées maintenance* performant et réactif. Ce département est organisé conformément aux trois axes précédemment décrits. En effet, il est structuré par gamme produit afin d'assurer une personnalisation de la gestion de la maintenance et une expertise des responsables d'interventions. Il assure un contact continu avec le service de conception des produits de la modalité en question, ainsi qu'une bonne communication avec les spécialistes de la santé pour chaque modalité concernée.

Il est aussi organisé par régions et par pays, afin d'avoir une gestion de la maintenance et des équipes dédiées orientées clients. Cette organisation facilite la rapidité d'intervention ainsi que la communication locale avec les clients.

D'autres services accompagnent le service classique de réparation. On peut citer la formation des techniciens des structures médicales, une assistance à distance de ces techniciens et une communication continue avec les clients.

Les critères de performance retenus dans ce contexte de maintenance sont l'efficacité technique propre de maintenance, à savoir la qualité de la réparation, mais aussi sa capacité à faire évoluer le système pour en limiter les causes de défaillance. Ce premier objectif se traduit par une amélioration des MTBF (Mean Time Between Failure) de ses systèmes. Par ailleurs, un autre objectif est de réduire le temps d'immobilisation d'un équipement en cas de défaillance, qui est mesuré par l'indicateur de performance MTTR (Mean Time To Repair). Une telle réduction passe notamment par l'amélioration des délais d'intervention, du diagnostic de panne et la maintenabilité du système sur un point technologique (l'aptitude du bien à être maintenu) mais aussi par la compétence des équipes d'intervention.

Pour répondre à ces objectifs, le service de maintenance de GEHC est organisé en 4 niveaux de réparation, sollicités en fonction de la gravité de la défaillance (figure 14) :

- ✓ Le service de diagnostic à distance qui permet d'assigner l'intervention aux responsables de réparation, ou de résoudre le problème à distance en se connectant au système. Un nombre significatif de défaillances sont ainsi réglées à distance sans avoir besoin d'une intervention. Il s'agit dans ce cas de pannes informatiques ou problèmes de manipulation.
- ✓ L'intervention du technicien de maintenance local, directement sur le site de la panne.
- ✓ L'assistance des ingénieurs régionaux de maintenance (qui sont plus spécialisés).
- ✓ L'assistance du service de la conception (dans le cas d'un problème de qualité et répétitif).

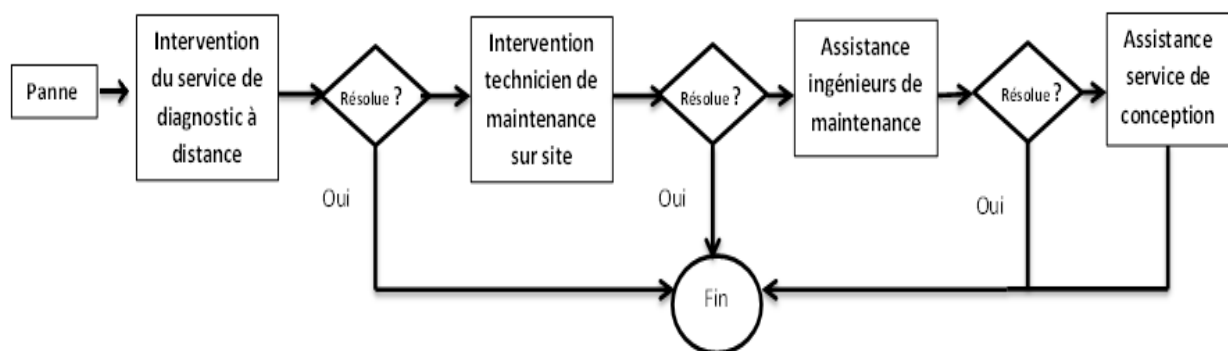


Figure 14: Processus de résolution d'une panne à GPRS

## II. La chaîne logistique des pièces de rechange chez GEHC

### a. Présentation de la chaîne logistique des pièces de rechange

Intuitivement, on pourrait être amené à penser que les contributions majeures à l'indisponibilité d'un système défaillant sont relatives au temps opératoires de maintenance (sécurisation, diagnostic, démontage, réparation, remontage, calibration et tests de remise en route) ou encore la disponibilité sur site du technicien de maintenance (disponibilité et durée de déplacement sur site). Cependant, dans son objectif de mondialisation, GEHC montre que le contributeur majoritaire de cette indisponibilité reste le temps d'acheminement de la pièce de rechange, en cas de réparation nécessitant un échange.

Compte tenu du nombre très important de ses produits et de ses clients, de la grande dispersion géographique de ses équipements (partout dans le monde), du caractère complexe de ses produits et du prix très élevé de certaines de ses pièces, GEHC cherche à rationaliser ses stocks de pièces de rechange en fonction de ses clients et de ses produits dans l'ensemble de son réseau de distribution. Ceci se traduit par un réseau de distribution efficace relayé par

un réseau d'entrepôts organisés par niveaux pour une « proximité » du client (essentiellement des centres hospitaliers et médicaux).

C'est le rôle du département GPRS *Global Parts & Repair Solutions* de GEHC de mettre à disposition la bonne pièce de rechange au bon moment et au bon endroit, tout en réduisant les différents coûts logistiques et en respectant les exigences douanières et de qualité des pièces afin de contribuer efficacement à la qualité de service demandée. Il supervise en plus, les ateliers de réparation internes des pièces de rechange et les processus de gestion de la fin de vie de ces pièces.

Afin de réaliser ses activités et atteindre ses objectifs, ce département s'est organisé en un ensemble d'équipes :

- ✓ Equipe cycle de vie : Assure le suivi des pièces sur le cycle de vie, notamment les opérations relatives à l'introduction des pièces et la fin de vie de pièces détachées.
- ✓ Equipe d'approvisionnement : Responsable de la passation et suivi des commandes, de la relation avec les fournisseurs, du niveau de remplissage en pièces de rechange dans les stocks.
- ✓ Equipe logistique : Responsable de la gestion des transporteurs et de la gestion des opérations des entrepôts.
- ✓ Equipe de solution client : Assure le contact avec le client (technicien de maintenance) et gère des situations d'urgence de pénurie des stocks.
- ✓ Equipe de la logistique inverse : Responsable des ateliers de réparation des pièces, des programmes de reprise et remise à neuf des pièces de rechange.
- ✓ Equipes support et centres d'excellence : Un ensemble d'équipes supportent les fonctions opérationnelles en mettant en place un ensemble de processus, en assurant la maintenance et l'amélioration des outils, en suivant et en contrôlant les indicateurs de performance : l'équipe de finances, l'équipe de qualité, l'équipe d'excellence opérationnelle, l'équipe de systèmes d'informations, l'équipe de suivi d'inventaire, l'équipe de planification.

En plus de cette organisation par fonctions, le département GRPS hérite des deux autres organisations de GEHC dans la répartition de ses activités:

- ✓ Organisation par modalité (technologie médicale): notamment pour le contact avec les fournisseurs en pièces de rechange d'un type de produit en particulier.
- ✓ Organisation par région : notamment pour le contact avec les équipes de maintenance de la région en question.

## **b. Solutions et attentes en gestion des pièces de rechange à GPRS**

GPRS utilise une gestion des flux de ses pièces de rechange selon une logique de push/pull au travers d'outils et d'équipes dédiés (tableau 1). Chaque responsable d'approvisionnement est en charge d'un portefeuille en fonction de la technologie médicale. Cela consiste en l'exécution du plan proposé par un logiciel de planification. Ce plan est basé sur les prévisions de la demande. Chaque responsable d'approvisionnement s'occupe donc de l'ensemble des pièces d'un portefeuille précis en plaçant des commandes chez les fournisseurs, le respect des délais d'acheminement par les fournisseurs et les transporteurs, jusqu'à la mise en stock de la pièce en quantité voulue dans l'entrepôt voulu : on est dans le cas d'une logique de flux poussés « push ».

Lors du déclenchement d'une demande client (via le technicien de maintenance), un algorithme cherche automatiquement la pièce dans l'entrepôt le plus proche du technicien de maintenance en question. Dans le cas d'une absence de la disponibilité de la pièce demandée dans le réseau de la chaîne logistique, une équipe dédiée prend en charge la réponse à ce « backorder » (demande en attente) par les fournisseurs via des solutions d'acheminement d'urgence tout en assurant le contact avec le service de maintenance : on est dans le cas d'une logique de flux tirés « pull ».

<b>Types de flux</b>	<b>Outils de génération des flux</b>	<b>Equipe d'exécution et suivi des flux</b>
Flux poussés Push	Outil de planification	Responsables d'approvisionnement (Contact avec le fournisseur)
Flux tirés Pull	Outil de gestion des demandes	Responsables de solution clients (Contact avec le technicien de maintenance)

**Tableau 1: Gestion des flux des pièces de rechange à GPRS**

Les mesures principales de la performance de cette chaîne logistique sont:

- ✓ La disponibilité des pièces de rechange dans le réseau logistique, exprimée par le nombre de commandes en attente au niveau global « Backorders » et par le niveau de commandes non satisfaites au niveau régional ou local.
- ✓ Le niveau des stocks (niveau d'inventaire), exprimé par la quantité des stocks et la valeur des stocks sur étagères et par le niveau d'excès en stocks.

Parmi les équipes de ce département, on retrouve notamment celle de la planification qui est chargée principalement de la définition des règles d'approvisionnement et de distribution des pièces entre les différents entrepôts. Elle définit donc des politiques de gestion des stocks de

type gestion des flux poussés. Elle base sa gestion sur un logiciel commercial de planification qui propose des recommandations pour l'équipe des responsables d'approvisionnement. Elle est aussi en charge de la maintenance et l'amélioration des recommandations de cet outil.

La disponibilité des pièces de rechange ainsi que les niveaux d'inventaire dépendent donc fortement de leurs recommandations. Ces préconisations se doivent de se reposer sur des pratiques et des modèles de planification efficaces. La performance de cette équipe se mesure donc au travers de sa capacité à fournir des plans à l'équipe d'approvisionnement (des recommandations en commandes....) qui permettent à la fois d'améliorer la disponibilité des pièces et de réduire les risques de surstock. Ces performances sont fonction de la qualité des prévisions, et donc des modèles associés, et des seuils d'approvisionnements proposés. Rappelons ici le caractère conflictuel de la gestion de la disponibilité et des risques de surstock, essentiellement maîtrisée par les valeurs dépendantes des seuils d'approvisionnement et des stocks de sécurité.

GPRS a exprimé son besoin d'améliorer ses processus de planification et son outil associé. Afin d'améliorer ses indicateurs de performance et de répondre à ses multiples défis de réactivité et d'efficience de sa chaîne logistique.

Dans ce contexte, le travail de projet de thèse a débuté par la conduite d'une analyse rigoureuse des processus de planification de l'équipe avec comme objectifs de formaliser les solutions actuelles et d'identifier leurs limites. Cette analyse a conduit aux conclusions suivantes :

Nous notons, SI pour chaque Solution Industrielle et AI pour chaque Attente Industrielle qu'on a pu identifier lors de cette analyse, afin de résumer cette étude dans le tableau 2 ci-dessous.

- ✓ **Segmentation :** Les processus de planification utilisent une segmentation des pièces de rechange pour définir les règles de planification et différencier les actions (par exemple le niveau de service du modèle de gestion de stocks). Cette segmentation est une combinaison de la quantité de la demande, du coût de la pièce et de sa criticité. (Solution industrielle 1 : SI1). Cependant, les enjeux de l'entreprise et les attentes en termes d'indicateurs de performance de la chaîne logistique changent en fonction du cycle de vie de la pièce et l'influence du profil de la demande sur l'atteinte de ses objectifs a été constatée.

Si, d'un côté, il existe une équipe dédiée qui gère des actions ponctuelles en fonction du cycle de vie de la pièce, d'un autre côté, les processus de planification ne prennent pas en compte ces phases du cycle de vie de la pièce. Ce constat a été identifié comme critique et



induit la nécessité de faire évoluer la segmentation des pièces en fonction des caractéristiques liés à leurs cycles de vie. Aussi la classification de la demande se limite à une de la quantité de la demande et ne considère pas sa variabilité et sa fréquence (Attente industrielle 1 : AI1).

- ✓ **Nature de données d'entrées** : Le contexte d'exploitation de GEHC ne permet pas aujourd'hui d'enrichir les données d'entrée afin de migrer vers de nouvelles approches orientées fiabilité. L'origine de la demande en pièces de rechange revient à la défaillance même du produit, une méthode de prévision reposant sur l'analyse des durées de vie de ces produits pourrait ainsi être menée. Cependant, on peut noter que cette analyse serait difficile à mener d'une part car ces durées de vie sont fortement dépendantes des conditions d'utilisation et d'environnement des produits propres à chacun des clients, et d'autre part au vu des grandes incertitudes sur les pratiques mêmes de gestion de chaque centre de distribution ainsi que la grande variabilité des processus d'acheminement. Les données actuelles d'entrée pour les modèles de prévision de la demande contenus dans le logiciel peuvent se résumer aux ordres d'approvisionnement et donc à la demande en pièces de rechange (SI2). L'amélioration de performance passera donc ici par une transition vers les méthodes avancées basées sur la demande (AI2).
- ✓ **Méthodes de prévision** : L'outil de planification utilise des modèles classiques de prévision de la demande (SI1). Or, ces modèles sont connus pour être peu efficaces pour des demandes faibles ou erratiques, propriétés généralement vérifiées pour les pièces de rechange [83]. Notre objectif sera alors d'analyser l'efficacité des approches courantes dans le processus global de la prévision de la demande et la gestion des pièces de rechange et de proposer des méthodes avancées et adaptées à ces caractéristiques de demande (AI3).
- ✓ **Indicateurs de performance** : Il n'est pas possible d'attribuer une fonction de coût total d'évaluation. Ceci est dû à la difficulté d'attribuer un coût de pénurie de stock (Backorders). Ces derniers ont un impact de satisfaction client et d'image de l'organisation, ainsi que de charge de travail supplémentaire à l'équipe dédiée. Les mesures principales de GPRS sont essentiellement le nombre pénurie de stocks et le niveau d'inventaire (SI4). Il sera nécessaire de proposer une démarche globale reposant sur la différenciation en termes d'évaluation des performances d'inventaire et de niveau de service pour lesquelles la construction de ces métriques restent indépendantes mais analysées d'une manière commune en fonction des priorités service/inventaire de la pièce en question (AI4)

- ✓ **Sélection des méthodes de prévision :** La sélection des méthodes de prévision pour les pièces repose sur l'erreur prévisionnelle (SI5), quantité purement statistique. La question est alors n'est-il pas possible de chercher à qualifier un modèle de prévision de la demande sur la base de ses performances non plus purement statistiques mais traduites par le processus global de gestion des stocks en fonction des niveaux de stockage des encours ou encore en termes de satisfaction de la demande ? (AI5).
- ✓ **Différenciation client :** Aujourd'hui la gestion des demandes en pièces de rechange est effectuée en premier arrivé premier servi (SI6). Le service de maintenance de GEHC a lancé une initiative de différenciation des contrats types de maintenance, par suite une différenciation en termes d'affectation et de disponibilité des techniciens de maintenance est désormais proposée aux clients. Or, l'objectif final de cette différenciation est la réduction du temps d'indisponibilité du système en panne, dans ce sens la disponibilité du technicien de maintenance peut s'avérer sans aucune valeur ajoutée, si elle n'est pas accompagnée par une disponibilité des pièces de rechange. Ainsi, il devient nécessaire que la chaîne logistique de pièces de rechange et notamment la gestion des stocks s'alignent avec cette initiative à travers la mise en place d'une différenciation de la disponibilité des pièces de rechange en stocks ainsi que dans la rapidité des solutions de transport de ces pièces. (AI6)

Le tableau suivant résume ces solutions de GPRS et ses attentes industrielles en solutions scientifiques de gestion des stocks.

<b>Sujet</b>	<b>Solution/Contrainte GPRS actuelle</b>	<b>Attente industrielle de GPRS</b>
<b>Segmentation</b>	Segmentation classique : en quantité de la demande/coût de la pièce/criticité	Prise en compte de la variabilité de la demande Prise en compte du cycle de vie de la pièce
<b>Données d'entrées</b>	Manque de données de fiabilité	Utilisation de modèles basés sur l'historique de la demande
<b>Méthodes de prévision</b>	Méthodes classiques	Méthodes considérant la demande faible et erratique
<b>Systèmes Indicateurs de performance</b>	Inadaptabilité de la mesure par une fonction de coût total	Double évaluation du niveau de backorders et d'inventaire
<b>Sélection des méthodes de prévision</b>	Sélection par mesure statistique	Sélection par les indicateurs finaux de GPRS
<b>Différenciation client</b>	Gestion de la demande en Premier arrivé, premier servi	Considération de la différenciation de la demande dans le système de GPRS

**Tableau 2: Solutions et attentes de GPRS en gestion des stocks**

## Conclusion

Ce chapitre a présenté le contexte industriel d'application des travaux de cette thèse, en partant de la présentation générale de l'entreprise et en passant par celle du département de la chaîne logistique des pièces de rechange, avant d'effectuer une analyse des processus de gestion de stocks de son équipe de planification.

En effet, le conglomérat GE met la délivrance des produits et des services pour les soins médicaux à travers sa branche GEHC au cœur de sa stratégie, cette branche est dotée d'un service de maintenance qui est en recherche continue d'amélioration du temps d'indisponibilité de ses systèmes lors d'une réparation. Ainsi, une chaîne logistique efficace des pièces de rechange est nécessaire pour assurer la disponibilité des pièces de rechange pour les techniciens de maintenance à travers des solutions de transport et d'entreposage tout en optimisant et en rationalisant les stocks.

L'équipe de planification est chargée de la gestion centralisée des stocks. Son outil fournit des plans basés sur des prévisions aux approvisionneurs. L'un des premiers points qui ressort

de notre analyse est le besoin d'uniformiser les pratiques qui aujourd'hui relèvent trop souvent d'initiatives individuelles n'offrant pas la maîtrise du processus de gestion et de distribution des pièces de rechange souhaitée par l'entreprise. Cette uniformisation des pratiques, pour être adoptée et efficace, ne devra pas se positionner en rupture totale des pratiques d'autant que l'expérience des approvisionneurs reste prépondérante. Ainsi, de notre point de vue, l'uniformisation de ces pratiques devra s'appuyer sur une rationalisation des pratiques actuelles en termes de gestion des stocks des pièces de rechange.

Un point complémentaire que nous pouvons souligner ici est que, bien que le nombre de données que les approvisionneurs se doivent de traiter, la quantité des données propres à la gestion d'une référence est très réduite et sa variabilité est importante. La qualité des estimations de la prévision de chacune des références se trouve alors fortement dégradée.

Il est alors difficile de mesurer dans la pratique les effets de la qualité des modèles de prévision de la demande actuellement utilisés chez GPRS sur les résultats actuels. Nous proposons dans les travaux de cette thèse d'analyser les relations en termes d'efficacité sur des considérations purement statistiques et des indicateurs de gestion des stocks sur la base du positionnement scientifique de cette problématique qui sera effectué dans le chapitre suivant.



## **Chapitre 3 : Positionnement scientifique et objectifs des travaux**

### **I. Positionnement scientifique**

- a. Caractéristiques scientifiques spécifiques à la chaîne logistique des pièces de rechange**
- b. La prévision de la demande**
- c. La gestion des stocks**

### **II. Analyse critique de la littérature et objectifs des travaux**

- a. Analyse critique de la littérature**
- b. Problématique et objectifs des travaux**
- c. Description générique des travaux**

## **Introduction**

Les premiers chapitres nous ont permis de situer la problématique abordée sur le plan de l'organisation industrielle, de la gestion des stocks de pièces de rechange dans des contextes de distribution étendue avec des niveaux de service différenciés. Nous avons confronté cette analyse aux pratiques actuelles du département GPRS de GEHC nous amenant naturellement à discuter de l'importance des modèles de prévision pour lesquels il reste difficile d'en quantifier les effets en fonction des divers attentes industrielles que nous avons soulignées dans ce deuxième chapitre.

Ce troisième chapitre vise à définir les pistes d'amélioration en termes de modèles et de pratiques pour satisfaire les critères de performance présentés dans le chapitre précédent. Pour se faire, nous chercherons dans un premier temps à établir un panorama des caractéristiques spécifiques à la gestion de pièces de rechange disponible dans la littérature. Par la suite, nous proposons d'illustrer l'influence de chacune de ces caractéristiques sur les processus actuels en prévision et en gestion des stocks. Avant d'effectuer une présentation de la problématique de la prévision de la demande et celle de la gestion des stocks en pièces de rechange.

### **I. Positionnement scientifique**

#### **a. Caractéristiques scientifiques spécifiques à la chaîne logistique des pièces de rechange**

La littérature a relevé un ensemble de caractéristiques spécifiques à la chaîne logistique des pièces de rechange et pouvant avoir une influence importante sur l'ensemble des processus en relation avec la classification, la prévision et la gestion des stocks.

La recherche dans ce contexte a été par conséquent motivée par les problématiques scientifiques associées à ces caractéristiques en proposant des méthodes et des approches d'optimisation et d'aide à la décision dédiées à cet effet. Il convient donc dans un premier temps de présenter ces caractéristiques avant d'expliquer celles qui seront retenues dans le cadre de cette thèse ainsi que les raisons de ce choix.

##### **✓ Caractéristiques de classification**

La classification des pièces de rechange pour la prévision et la gestion des stocks fait appel à des segmentations supplémentaires à ceux de la gestion classique. En effet, d'autres critères peuvent rentrer en jeu comme : la criticité de la pièce, son mode de réparation, ainsi que son âge pouvant générer des exigences différenciées en termes de service et de besoins supplémentaires en méthodologies adaptés à ces critères de segmentation [63], par exemple

une pièce en introduction exige plus d'intérêt en niveau de service par rapport à des pièces en fin de vie (CS1 : Caractéristique scientifique 1).

#### ✓ **Caractéristiques relatives aux données d'entrées de l'approche de prévision**

La littérature de prévision en pièces de rechange peut être organisée en deux grandes familles, celle de la prévision de la demande (basée sur l'historique de demande) et celle de la prévision de pannes (basée sur les données de fiabilité).

Dans un contexte de gestion globale et centralisée des pièces de rechange, avec un catalogue très important de systèmes et de pièces associées utilisées dans des environnements et avec des fréquences différentes, il est extrêmement délicat de définir une politique de gestion de pièces de rechange uniquement sur la base des connaissances fiabilistes des systèmes. La principale raison est le manque de données de fiabilité objectives liées notamment aux modes de fonctionnement des systèmes dans leur contexte opératoire propre au client (et donc qui échappe au gestionnaire du service maintenance). « *La théorie de fiabilité peut être utile mais son utilisation nécessite énormément de données qui peuvent être difficile à obtenir* » [64]. Ainsi, en l'absence de ces données de fiabilité ou de leur faible qualité, la seule donnée sur laquelle on puisse finalement se reposer reste la demande en pièces de rechange remontée au niveau des bases de données, d'une manière totalement intégrée. Pour cette raison, notre recherche s'inscrit dans le cadre des travaux de prévision basés sur la demande (CS2).

Par ailleurs, l'estimation de la demande en pièces de rechange est souvent délicate, pour cause de demande souvent faible et erratique. On qualifie cette demande de catégorie de demande difficile à prévoir (Hard-To-Forecast), et nécessitant alors des méthodes de prévision spécifiques [65] (CS3).

#### ✓ **Caractéristiques relatives à la gestion des stocks**

- Les coûts de pénurie des stocks sont souvent difficiles à estimer et à quantifier. En pratique, il s'agit plus d'un niveau de qualité de service plutôt qu'un coût qu'on associe à une quantité de backorders. Il devient compliquer donc d'estimer une fonction de coût total [66] (CS4).
- La demande étant très incertaine dans ce contexte, les erreurs de prévisions sont par conséquent plus importantes entraînant alors une difficulté d'optimisation des niveaux de stocks ainsi que de la qualité du niveau de service et donc le paramétrage des modèles de gestion des stocks [67] (CS5).
- La relation entreprise/client dans le cas d'une gestion des pièces de rechange (service après-vente) est souvent contractualisée. Les exigences des contrats imposent le besoin



d'avoir une différenciation en fonction de l'importance du contrat dans les processus de la chaîne logistique en général et dans le processus de gestion des stocks en particulier [68] (CS6).

#### ✓ **Caractéristiques relatives à la politique de réparation**

- La demande en pièces de rechange est tirée par des politiques de maintenance et par une fréquence d'utilisation des systèmes. Ces deux faits, surtout le second, sont propres à l'utilisateur et non aux fournisseurs mais peuvent dans certains cas être plus ou moins maîtrisés (surtout dans le cas d'une contractualisation du niveau de service). Des leviers d'actions sur cette demande sont donc envisageables dans ce contexte contrairement au contexte classique (par exemple en combinant la décision de la politique de maintenance avec la politique de gestion des stocks) [69].
- Par ailleurs, un autre aspect de différenciation est la considération d'éléments réparables et non-réparables ou consommables. Dans le cas de consommables, la pièce se devra alors d'être échangée par une nouvelle pièce généralement équivalente pour le rétablissement de la fonction du système à maintenir. Le consommable ne pourra plus être utilisé contrairement à une pièce réparable. La différenciation se fait alors sur plusieurs points. Le premier est la distinction des modèles de chaînes logistiques [70] Parmi ces politiques de maintenance, on peut distinguer celle qui permet de séparer entre deux types de pièces de rechange : les pièces consommables et les pièces réparables, chacun avec un modèle de chaîne logistique différent [70]. Les premières sont non-réparables suite à leur remplacement. Les deuxièmes peuvent être réparées suite à leur remplacement, par des ateliers de réparations internes ou externes à la chaîne logistique de l'entreprise. Ainsi dans le cas des pièces réparables un flux supplémentaire de pièces réparées est à considérer dans l'alimentation des stocks en plus du flux d'approvisionnement [71].
- La demande en pièces de rechange est parfois satisfaite par le biais de pratiques de réparation dites de « cannibalisme » sur d'autres pièces : utilisation du stock d'une référence pour la satisfaction de la demande d'une autre. Ces flux peuvent être considérés dans le dimensionnement des stocks, dans ce cas le stock d'une référence devra non seulement couvrir la demande de la référence en question mais aussi la probabilité de « cannibalisme » par d'autres références [65].
- La demande en pièces de rechange peut être générée parfois par des phénomènes de dépendance entre composants ou entités d'un même système. Une panne peut en générer une autre. Quand l'estimation de la demande est basée sur un modèle de fiabilité, certaines configurations de ces modèles permettent de considérer cette dépendance [65].

Dans ces travaux nous ne traitons pas les problématiques relatives à des estimations basées sur des modèles fiabilistes et les politiques de maintenance associées, qui nécessitent d'abord l'existence d'une base de données de fiabilité et de politiques de maintenance, d'avoir des outils de planification des pièces de rechange capables d'intégrer la base de données des systèmes et des politiques de maintenance relatifs à ces pièces. En effet, si une approche basée sur une étude fiabiliste par système ou sous-système, pour un contexte d'utilisation précis, une politique de maintenance définie et un comportement de technicien de maintenance maîtrisé peut s'avérer très efficace, elle devient extrêmement difficile à généraliser et surtout reproduire une étude fiabiliste, pour un grand nombre de type de systèmes, avec plusieurs types de sous-systèmes (mécaniques, électriques, informatiques...), pour un large nombre des références qui peuvent être associées à différents systèmes, utilisée dans plusieurs contextes/pays, avec une politique de maintenance et un comportement de remplacement chez les responsables de maintenance qui change pour la même référence d'une région à une autre. Ainsi, dans ce contexte on favorise une gestion par classe de références ayant les mêmes caractéristiques statistiques ainsi que le même niveau de maturité des pièces.

Par conséquent, nous nous concentrons dans ces travaux sur les problématiques scientifiques relatives à la classification, aux prévisions basées sur la demande et la gestion des stocks basée sur ces prévisions, dans un contexte de gestion globale et centralisée des pièces de rechange, que nous détaillerons dans les chapitres suivants.

### **b. La prévision de la demande**

La prévision se définit comme l'observation d'un ensemble de données qui permet d'envisager une situation future et d'entreprendre des actions pour y parer concrètement [72]. « *La prévision, c'est porter un jugement sur les événements ou évolutions possibles à venir en utilisant comme outils le passé et le présent* ». [73]

La finalité de la prévision ne se limite pas à la seule action d'estimation des situations futures. Elle représente par ailleurs une entrée principale pour les modèles d'aide à la décision surtout quand il s'agit d'un environnement très incertain, « *une prévision est souvent requise à chaque fois qu'une décision est prise* » [74], « *les prévisions ne sont pas faites pour elles-mêmes mais comme entrées aux décisions* » [75]. Elle sert aussi pour la construction des stratégies d'anticipation des entreprises [76].

La prévision de la demande est un des types de prévision : « *La demande peut être définie comme la quantité de produit ou de service que les personnes désirent et sont capables d'acheter pendant une période spécifique* ». « *La prévision de la demande est l'art de prédire*

le niveau de demande qui pourrait se produire à un point ou une période spécifique au future » [77]. La prévision de la demande peut utiliser des méthodes, des processus et des pratiques liées à d'autres types de prévision (météorologique, économétriques...) [78], comme elle peut utiliser des méthodes communes avec ces types, connues par leur efficacité statistique comme les méthodes de lissages [79].

Pour répondre aux caractéristiques particulières de la demande en pièces de rechange décrites ci-dessous, une littérature indépendante de prévision de la demande en pièces de rechange a été développée et a été dissociée de la prévision de la demande classique (comme la prévision de ventes/d'achats en produits) [80]. Cette littérature était par ailleurs souvent associée aux mots clés de prévision d'une demande faible, intermittente, erratique et sporadique [81].

Cette littérature a souvent suivi le processus de prévision classique dans ses trois étapes, tout en apportant des contributions au contenu de ce processus. Ces trois étapes sont les suivantes [82]:

- ✓ *L'étape de pré-processing*, dans laquelle une classification des références qui seront objets de calculs des prévisions est effectuée, afin de différencier le traitement en prévision dans l'étape suivante.
- ✓ *L'étape de processing*, dans laquelle les méthodes de prévision utilisées sont détaillées.
- ✓ *L'étape du post-processing*, qui consiste en la comparaison entre les méthodes de prévision par des mesures d'erreurs prévisionnelles.

Les méthodes utilisées dans ce processus ont été adaptées au cas de la demande en pièces de rechange, notamment pour les deux premières étapes :

- ✓ *Dans l'étape du pré-processing*, une catégorisation de la demande par combinaison de variabilité et fréquence de la demande a été utilisée plutôt qu'une catégorisation par quantité de la demande [83]. Ceci permet de construire des grandes classes des pièces de rechange puis de chercher les méthodes adaptées à chaque classe de demande dans les étapes suivantes.
- ✓ *Dans l'étape du processing*, la limite des méthodes de prévision classiques a été signalée et confirmée par évaluation de leur qualité prévisionnelle sur des données d'historique de pièces de rechange. Par suite, des méthodes adaptées aux caractéristiques d'une demande sporadique ont été proposées [84]. Ces méthodes ont essayé d'éviter l'effet des valeurs nulles de l'historique sur la qualité de la prévision. Dans ce sens, on peut distinguer la méthode de « Croston » qui fait une prévision séparée de la quantité et de l'intervalle de la demande [85], la méthode de bootstrapping qui fait une génération des occurrences de la demande sur la base d'un re-échantillonnage [86], la méthode de réseaux de neurones qui

se base sur un apprentissage automatique entre des vecteurs d'entrées et de sorties à travers des fonctions de transfert [87].

- ✓ *Dans l'étape du post-processing* : la nouvelle méthode proposée est souvent comparée avec des méthodes classiques en utilisant des mesures statistiques d'erreur prévisionnelle [88].

Bien que ce processus soit destiné à proposer des prévisions à utiliser dans le modèle de gestion de stocks, le modèle de gestion de stocks n'est pas utilisé dans les travaux précédemment cités pour évaluer la qualité finale de ce processus. De même, la sélection de la méthode de prévision ne se base pas sur des indicateurs de gestion de stocks, il sera par conséquent intéressant de faire évoluer ce processus pour intégrer cet aspect de gestion de stocks.

Ainsi, ce processus de prévision de la demande en pièces de rechange sera détaillé dans le chapitre 4 relatif à cette problématique afin de clarifier ses limites et de présenter les améliorations apportées à ce processus dans ces travaux.

### **c. La gestion des stocks**

Les stocks sont définis comme « *L'ensemble des matières (directes ou indirectes) et des produits (finis ou en cours de fabrication) qui appartiennent à une entreprise industrielle ou commerciale à une date donnée et qui sont entreposés dans l'attente de leur utilisation ou de leur vente* » [89].

La gestion de ces stocks est définie comme « *le processus qui consiste en l'alignement des investissements en matériel et en pièces qui seront misent en stocks, avec des limites (seuils) prédéterminées à travers une politique de gestion des stocks établie par le management* » [90].

On comprend donc que le processus de gestion des stocks, dans sa définition complète, ne se limite pas à la génération de seuils de stocks, mais couvre les démarches de suivi du respect de ces seuils et le contrôle financier de l'inventaire. Nous nous limitons dans cette thèse à la partie qui couvre la définition des besoins en stocks par la génération des seuils d'approvisionnement [91].

Les principales questions couvertes par cette littérature sont principalement :

Que va-t-on stocker? Faut-il stocker ? Quand et Combien stocker?

- ✓ *Que va-t-on stocker ?*

Plusieurs types de matériels peuvent être stockés : les matières premières, les encours (WIP Work-In-Progress), les produits finis, les pièces de rechanges.... [66], [91].

Dans ce sens on peut ainsi différencier entre:

- les travaux relatifs à la gestion des stocks en systèmes de production qui sont plutôt associés à la gestion des encours [92]. Dans ce cas, l'objectif est l'élimination de ces stocks, considérés comme des anomalies, à travers l'amélioration de la productivité des goulots d'étranglement,
- les travaux relatifs à la gestion des stocks en systèmes logistiques qui sont plutôt associés à la gestion des stocks en entrepôts de stockage [93]. Dans ce cas, l'objectif est de trouver un équilibre entre l'amélioration du service par la disponibilité de ce stock et la réduction des surstocks.

#### ✓ *Faut-il stocker ?*

Avant de décider combien et comment stocker, On se pose d'abord la question suivante: est-ce qu'on veut stocker ?

En effet, la gestion des flux logistiques distingue entre deux stratégies de décision de stockage :

- La gestion à la commande : MTO (Make-To-Order) dans ce cas aucun stock n'est prévu et l'organisation ne place des commandes chez son fournisseur qu'une fois la demande du client est enregistrée. La satisfaction de la demande du client dure ainsi la totalité du temps d'acheminement entre le fournisseur et le client [94].
- La gestion par stock : MTS (Make-To-Stock) dans ce cas un stock est prévu et l'organisation essaye de satisfaire la demande de son client par son propre stock sauf dans le cas de pénurie de stocks [95].

La décision de MTO ou MTS dépend principalement de la catégorie du produit ou de la pièce. On peut par ailleurs trouver des modèles combinant MTO/MTS d'une manière dynamique sur la base d'un modèle décisionnel. Dans le cas d'une gestion des pièces de rechange, cette décision peut dépendre, entre autres, de la criticité de la pièce et de son temps d'approvisionnement.

Compte tenu de la criticité des pièces de rechange surtout dans notre cas d'application industrielle dans un domaine médical le mode MTS est plus adapté car il permet une disponibilité des stocks dans le réseau logistique évitant d'attendre pendant tout le temps d'approvisionnement.

#### ✓ *Quand et combien stocker ?*

La littérature des politiques de gestion des stocks permet de répondre à ces questions. Elle a comme objectif de déterminer les seuils de réapprovisionnement et la fréquence de commande

afin d'assurer un bon niveau de service par ce stock tout en réduisant les coûts de stockage et de transport.

Ainsi, deux types de revue de stocks ont été distingués [96]: une revue continue où le contrôle de stock et la passation de commandes se font d'une manière continue, une revue périodique où le contrôle de stock et la fréquence de commande se font d'une manière périodique, par exemple chaque 3 mois.

Deux types de quantités à commander ont aussi été distingués : une quantité fixe reposant sur un calcul préalable d'une quantité économique à commander, ou une quantité variable reposant sur les actualisations des prévisions [97].

Dans le cas de la gestion des stocks en pièces de rechange, la politique à revue continue est favorisée, compte tenu de sa réactivité à une demande critique et variable [98]. Aussi, la politique à quantité variable est favorisée pour s'aligner à une demande variable ainsi que pour réagir aux erreurs de prévision [99].

Par ailleurs, la modélisation de ces politiques de gestion de stock diffère en fonction des types de commandes clients : qui peuvent être des commandes perdues (lost sales) ou en attente (Backorders) [100], de la distribution de la demande [101], des caractéristiques du temps d'approvisionnement [102], de la considération ou pas des coûts logistiques [103].

La gestion des stocks en pièces de rechange suit souvent un modèle en commandes en attentes (Backorders), à cause de la nature souvent contractuelle du service après-vente. Ceci est dû notamment à la complexité technique de certains systèmes qui fait qu'il est difficile de trouver la même pièce de rechange chez la concurrence [104].

La gestion des stocks en pièces de rechange se fait dans un contexte de demande sporadique et dans certains cas l'absence de données fiables de fiabilité. Ceci fait que les erreurs de prévisions sont relativement importantes et la projection sur la base des prévisions avec un stock de sécurité pour absorber la variabilité est nécessaire afin d'assurer une anticipation surtout pour la demande en pièces de rechange critiques [50].

Ces modèles de politiques de gestion de stocks seront détaillés dans le chapitre 5 réservé à ce sujet, notamment ceux basés sur des prévisions, ce qui permettra de présenter par la suite une intégration de ces modèles avec les méthodes de prévision.

Ces modèles sont paramétrés en fonction des classifications des pièces, ainsi différents critères ont été utilisés dans la gestion de stocks pour définir la stratégie de gestion et de contrôle de stocks avec différents niveaux de priorité. Les classes sont déterminées par des approches quantitatives via une distribution ABC ou par des approches qualitatives par la méthode AHP [105]. On distingue notamment la prise en compte de l'aspect de criticité des

pièces de rechange. En effet, si certaines pièces sont vitales pour une réparation, donc nécessitant une importante disponibilité des pièces, d'autres sont cosmétiques et ne nécessitent pas forcément une grande réactivité à la demande par du stock [106]. Les indicateurs de performance en niveau de service et en stocks permettent d'évaluer les différentes stratégies adoptées par rapport aux différentes classifications utilisées. Ces classifications seront détaillées aussi dans le chapitre 5 dans l'étape de classification du processus de gestion de stocks.

Une autre classification largement abordée dans la littérature de la gestion des stocks en pièces de rechange est celle de la segmentation client [107]. En effet, cette gestion des pièces est souvent couverte par un contrat de maintenance. Or, par souci de personnalisation du service, différents types de contrats peuvent être proposés avec différents choix de niveaux de réactivité à la panne et par suite de disponibilité des pièces de rechange.

Dans le cas d'une segmentation client, les modèles de gestion de stocks classiques ne permettent pas de différencier entre une classe de clients prioritaires (en disponibilité des pièces) et une autre moins prioritaire [108]. Ainsi de nouveaux modèles ont été proposés permettant cette différenciation. Ils sont principalement basés sur la définition d'un niveau critique au-dessus duquel le client non-prioritaire n'est plus servi [107].

Cette différenciation client en gestion de stocks en pièces de rechange sera détaillée dans le chapitre 7 consacrée à cette problématique.

## **II. Analyse de la littérature et objectifs des travaux**

### **a. Analyse de la littérature**

#### **✓ Une indépendance entre les deux littératures de prévision et de gestion des stocks**

Le principal constat qu'on peut faire après l'analyse bibliographique de la prévision et la gestion des stocks en pièces de rechange réside dans l'importante indépendance entre ces deux littératures, qui sont pourtant à finalité commune, c'est-à-dire l'amélioration de la disponibilité des pièces de rechange à moindre coût d'inventaire.

Cette remarque rejoint finalement la réalité des pratiques industrielles. Ainsi, les outils fréquemment utilisés dans la planification sont constitués souvent de deux modules distincts : un de prévision et un autre de gestion des stocks. La seule interaction entre les deux modules réside dans le fait que les sorties du premier sont les entrées du second. (L1 : Limite 1)

Ainsi, une intégration entre ces deux problématiques pourra permettre un alignement entre les objectifs et les évaluations des performances des modèles de ces deux problématiques, par suite une sélection des modèles sur la base d'une évaluation commune.

### ✓ **Quelle segmentation des pièces de rechange ?**

La même remarque d'indépendance entre le processus général de prévision et celui de la gestion des stocks revient dans le cas de la classification des pièces de rechange pour la prévision et/ ou pour la gestion des stocks.

En effet, pour la prévision, cette segmentation est souvent statistique, notamment en fonction de la variabilité et de la fréquence de la demande [83]. Cette segmentation statistique permet d'identifier l'approche de prévision à utiliser, de tester les limites ou les performances de certaines méthodes de prévision.

Pour la gestion des stocks, le terme classification est utilisé. Elle est souvent en coûts des pièces et en impact sur le business, comme celle effectuée par la loi de Pareto [109]. Pour le cas des pièces de rechange, des segmentations supplémentaires, essentiellement en criticité/vitalité des pièces, sont utilisées [106]. Cette classification permet de choisir la stratégie de gestion de stocks à suivre et de paramétrer les composantes du modèle de gestion des stocks, par exemple, la détermination du niveau de service.

On est donc devant deux types de segmentations indépendantes, plutôt qu'une approche intégrée comme le précise la critique de [105] « *La comparaison de la littérature de prévision et de classification en pièces de rechange, montre que dans la littérature scientifique, une perspective intégrée pour la gestion des pièces de rechange (classification, demande, gestion des stocks, tous ensemble), est souvent absente ou limitée* ».

Or le plus approprié serait d'avoir une segmentation commune de prévision et gestion de stocks, permettant de définir une stratégie générique et cohérente pour chaque segment.

Parmi, les segmentations peu utilisées et pourtant ayant un impact important sur les deux processus, on distingue la segmentation en cycle de vie des pièces :

D'un point de vue prévision, la distribution de la demande change significativement en fonction du niveau de maturité de la pièce. D'un point de vue gestion des stocks, les enjeux et les risques de stockage changent aussi significativement en fonction de ce niveau de maturité. Finalement, les travaux de segmentation ont souvent été présentés en vue de la formulation de propositions qualitatives pour chaque segment (quelle stratégie de stockage, quelle relation fournisseur...) [110], plutôt que pour faire des propositions quantitatives pour identifier les méthodes adaptées pour chaque segment, ou le niveau de service à utiliser par le modèle de gestion de stocks des pièces de rechange. (L2)

### ✓ **La segmentation du niveau de service par classe client**

La gestion des pièces de rechange, aujourd'hui majoritairement encadrée par des contrats de maintenance, qui en plus se fait dans un contexte économique international, peuvent exiger



une couverture de plusieurs classes de client et une flexibilité de l'offre, un écrémage vers le haut ou vers le bas de la clientèle. Le modèle de contrat unique atteint ainsi ses limites pour donner lieu à plusieurs contrats types. Ceci se traduit, par suite, en un besoin de différenciation du niveau de service en chaîne logistique de pièces de rechange. Cette différenciation entraîne une augmentation de la complexité des règles de gestion, et in fine de l'évaluation de performance de la chaîne logistique et des modèles associés.

Comme pour toutes les fonctions de la chaîne logistique, celle de la gestion des stocks doit tenir compte de cette différenciation. (On peut par exemple citer aussi la différenciation par la fonction logistique à travers la proposition de différents temps de transports).

Ainsi, des politiques de gestion de stocks sous différenciation ont été proposées sous différents critères [107] [108], pour permettre d'augmenter le niveau de disponibilité des pièces en stocks pour les clients prioritaires, sans augmenter significativement les coûts de stocks.

Cependant, si d'une part il existe peu de travaux de gestion de stocks sur des prévisions dans le cas de gestion des stocks classique (sans différenciation client), les solutions de gestion de stocks à différents niveaux de service sur des prévisions sont quasi absentes, il est en de même pour la comparaison entre les politiques de gestion de stocks basées sur des méthodes de prévision avec des classifications en pièces de rechange. (L3)

Le tableau 3 suivant résume cette partie et son positionnement par rapport à la littérature.

<b>Problématique</b>	<b>Importantes références</b>	<b>Opportunité de développement</b>
Intégration prévision et gestion des stocks	[82], [105]	Manque de processus et de mesures de sélection de méthodes de prévision sur la base d'indicateurs de gestion des stocks
Segmentation des pièces de rechange	[83], [109]	Segmentation cycle de vie des pièces. Besoin d'alignement entre la segmentation en prévision et la classification en gestion des stocks.
Processus général de prévision en pièces de rechange	[82]	Opportunité de reconstruction d'un nouveau processus général de prévision orienté gestion des stocks et basé sur les caractéristiques des pièces.
Différenciation client en gestion des stocks	[107], [108]	Politiques de gestion de stocks sur des prévisions dans le cas de différenciation client.

**Tableau 3: Opportunités de développement en problématiques de prévision et de gestion des stocks**

## b. Problématiques et objectifs des travaux

La problématique générale du présent travail rejoint les caractéristiques et les problématiques spécifiques à la chaîne logistique des pièces de rechange (partie I. d), ainsi que les constats et les besoins définis par la chaîne logistique des pièces de rechange de notre cas d'application industrielle (partie II. c).

Nous concentrerons notre travail sur la réponse aux problématiques énoncées dans les points (CS1) à (CS6) qui rejoignent les besoins industriels (BI1) à (BI6).

Nous insisterons sur la prise en compte du besoin en orientations de la chaîne logistique en fonction des catégories des pièces, ou de contrat client (D1, D2).

En plus de ces caractéristiques spécifiques, nous nous focaliserons sur les limites et les liens manquants de la littérature de prévision et de gestion de stocks en pièces de rechange (L1, L2, L3).

L'intersection entre ces différents éléments est représentée dans le tableau 4 suivant :

Intersections	Caractéristique scientifique de la chaîne logistique des pièces de rechange	Besoins du contexte industriel	Limites de la littérature de prévisions et de gestion des stocks	Besoin de différenciation de la stratégie de la chaîne logistique
I1	Segmentation spécifique aux pièces de rechange (CS1)	Besoin de prise en compte de la phase de vie dans les décisions de planification (BI1)	Besoin d'une segmentation commune et d'une prise en compte du cycle de vie (L2)	Différenciation produit (D1)
I2	Manques de données de fiabilité (CS2)	Modèles basés sur la demande (BI2)		
I3	Demande faible et erratique (CS3)	Besoin de méthode de prévisions adaptées à la demande incertaine (BI3)		
I4	Difficulté d'estimer une fonction de coût globale (CS4)	Evaluation en niveau de service et d'inventaire (BI4)		
I5	Importante influence des prévisions sur les stocks et le niveau de service (CS5)	Besoin d'évaluation de la méthode de prévision en coût et en service (BI5)	Intégration entre prévision et gestion des stocks (L1)	
I6	Prise en compte du niveau de contrat client dans la gestion de la chaîne logistique (CS6)	Besoin de suivre les initiatives du service en différenciation de l'offre de maintenance (BI6)	Gestion des stocks à différents niveaux de service sur des prévisions (L3)	Différenciation contrat (D2)

**Tableau 4: Intersections entre les différents positionnements des travaux**

Plus particulièrement, nous attacherons une importance majeure à répondre aux besoins en termes de **Segmentation, prévision et politiques de gestions des stocks pour différents niveaux de service dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange.**

L'analyse approfondie de cette problématique générale dans les études industriels de la littérature dénote un réel besoin d'évolution des modèles de prévision pour l'estimation de la demande en pièces de rechange, particulièrement difficile à cause du caractère faible et sporadique, caractéristique mentionnée dans la littérature et vérifiée dans notre cas industriel (presque 75% des références, selon des critères définis ultérieurement dans ce rapport). Par ailleurs, l'efficacité d'un modèle de prévision de la demande ne doit pas se mesurer à la simple adéquation statistique mais aussi en termes d'effets sur la chaîne logistique et plus particulièrement sur la gestion des stocks. On peut déjà souligner que les caractéristiques de la demande évoluent en fonction d'un ensemble de facteurs qu'il sera important d'identifier. Ceci devra alors conduire à la définition d'une segmentation des pièces à la fois pour le processus de prévision et celui de la gestion des stocks d'une manière intégrée, et l'identification des modèles de prévision les plus efficaces avec une vision gestion des stocks. Il sera par ailleurs important de déterminer un ensemble d'indicateurs de performance pour s'aligner avec les préoccupations du décideur.

Un autre enjeu de cette thèse est relatif aux difficultés de la chaîne logistique des pièces de rechange à suivre la flexibilité des contrats de service de maintenance et notamment la différenciation du niveau de service. Les chaînes logistiques classiques des pièces de rechange ont tendance à avoir une gestion commune avec une politique de premier arrivé premier servi, principalement pour éviter d'ajouter un niveau de difficulté à la chaîne, étant initialement et naturellement complexe. C'est le cas de notre application industrielle. Cependant, la personnalisation de la chaîne devient une nécessité pour répondre à une clientèle particulièrement exigeante, surtout dans le secteur médical, tout en évitant des investissements supplémentaires. Nous chercherons ainsi à développer des politiques de gestion des stocks à différents niveaux de service basées sur des prévisions. Cette problématique prend tout son sens dans le contexte de pièces de rechange dû au fait d'une faible rotation des produits, leur coût unitaire et un délai de livraison souvent importants.

Les questions de cette problématique sont donc : Quelle segmentation pour les pièces de rechange ? Quelle méthode de prévision pour chaque segment ? Quels modèles de gestion de stocks basés sur des prévisions ? Quelle stratégie d'évaluation commune de prévision et de gestion des stocks ? Quels modèles de gestion des stocks basés sur des prévisions dans le cas d'une différenciation client?

### c. Description générique des travaux

Par rapport à la problématique principale de la prévision de la demande en pièces de rechange, un nouveau processus de prévision de la demande en pièces de rechange pour la gestion des stocks sera proposé (chapitre 4).

Dans le premier sous-processus, les différents types de classification seront définis. Cette nouvelle classification a l'avantage d'intégrer à la fois, les caractéristiques statistiques de la demande, mais aussi le niveau de maturité de la pièce de rechange.

Dans le deuxième sous-processus, un ensemble de méthodes de prévisions seront utilisés, cela va couvrir les méthodes classiques et les méthodes de la demande faible et de haute variabilité de la littérature, et des méthodes de prévision hybride combinant les prévisions de ces méthodes seront proposées pour améliorer la précision des estimations.

Dans le troisième sous-processus, de nouvelles mesures de sélections des méthodes de prévision selon la classification de la pièce seront proposées, qui sont orientées performance en gestion des stocks plutôt que performance statistique.

Dans la partie gestion des stocks (**Chapitre 5**), les principales classifications des types de modèles seront présentées, les modèles de gestion de stocks basés sur des prévisions seront détaillés et la performance en niveau de service et en inventaire d'un modèle de gestion de stocks pour différentes classes de demande et de niveau de maturité des pièces sera effectuée, ce qui permettra une aide à la décision pour la détermination du niveau de service théorique à utiliser dans ce processus.

Dans la partie suivante (**Chapitre 6**), un nouveau processus intégré de sélection de méthodes de prévision et de modèles de gestion des stocks sera proposé, qui permettra de répondre non seulement au besoin de segmentation et d'évaluation commune de ces deux processus, mais aussi une prise en compte des considérations des décideurs. Dans ce sens, une modélisation de la sélection sur la base d'une méthodologie d'aide à la décision multicritères sera présentée.

Dans la dernière problématique (**Chapitre 7**), une organisation des travaux de la littérature de la gestion des stocks à différents niveaux de service sera proposée, sur cette base un ensemble de pistes de recherche de cette problématique sera identifié et une approche de modèle de gestion des stocks sur des prévisions pour différents niveaux de service sera présentée.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons d'abord présenté les principales caractéristiques d'une chaîne logistique des pièces de rechange particulièrement l'aspect contractuel de son service qui doit répondre à une demande sporadique des techniciens de maintenance, ce qui rend la prévision de la demande plus délicate avec une influence importante sur ses indicateurs de performance surtout dans l'absence de données de fiabilité.

Nous avons par la suite positionné les travaux de la thèse par rapport aux problématiques de prévision et de gestion de stocks, ce qui nous a permis de définir un ensemble d'opportunités de développement comme l'intérêt de l'évaluation des méthodes de prévision par des indicateurs de gestion de stocks, de l'utilisation du cycle de vie de la pièce dans cette évaluation et la considération de la différenciation client, d'où l'objectif de construction d'un processus intégré de segmentation des pièces de prévision et de gestion de stocks à différents niveau de service.

La deuxième partie suivante vise à répondre aux objectifs définis dans ce chapitre en apportant des améliorations à chaque étape des processus de prévision et de gestion de stocks à travers l'exploitation de l'ensemble des opportunités soulignées dans ce chapitre.

## Deuxième partie

# Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks

**Chapitre 4 : Processus de prévision de la demande en pièces de rechange**

**Chapitre 5 : Processus de gestion des stocks basée sur des prévisions**

**Chapitre 6 : Processus intégré de la sélection des méthodes de prévision sur des critères de gestion de stocks**

**Chapitre 7 : Processus de gestion des stocks à différents niveaux de service**

## **Chapitre 4 : Processus de prévision de la demande en pièces de rechange**

### **I. Analyse du processus de prévision en pièces de rechange**

- a. Etape du pre-processing : Classification des données
- b. Etape du processing : Modèles de prévision de la demande
- c. Etape du post-processing : Critère d'évaluation de la performance
- d. Limites du processus classique de prévision

### **II. Propositions d'améliorations du processus de prévision en pièces de rechange**

- a. Etape du pre-processing: Extension des critères considérés
- b. Etape du processing: Proposition de méthodes hybrides
- c. Etape du post-processing : Indicateurs de sélection orientés gestion des stocks

### **III. Expérimentation du nouveau processus sur données réelles**

- a. Plan d'expérience
- b. Résultats de la comparaison de la sélection par classifications
- c. Résultats de l'évaluation des méthodes hybrides

## Introduction

La prévision de la demande est une des problématiques les plus critiques en gestion des stocks et notamment concernant les pièces de rechange [111]. En effet, dans ce cas, il est nécessaire d'estimer avec précision l'occurrence de la demande : une sous-estimation conduit à des ruptures de stocks quasi-immédiates (et par suite un temps important d'indisponibilité du système en panne), une surestimation entraîne de forts coûts d'immobilisation et des risques d'obsolescence compte tenu du caractère très faible de la demande.

Par ailleurs, la demande en pièce de rechange est liée à la défaillance du produit ou encore à une stratégie de maintenance préventive spécifique. Dans notre cas, rapprocher le processus de caractérisation de la demande en pièces de rechange par une analyse fiabiliste des produits ne semble pas être réaliste, car les pratiques internes de l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique ainsi que les comportements d'utilisation des clients sont faiblement maîtrisés. Aussi, nous proposons de concentrer notre analyse bibliographique sur les modèles de prévision de la demande reprenant une approche basée sur l'historique de la demande, au vue d'une meilleure gestion des stocks.

Afin de mesurer la performance du modèle de prévision dans le cas des pièces de rechange, un processus généralement proposé est composé de trois étapes :

- Le « pré-processing » qui permet de classer les demandes en fonction de la fréquence et du niveau de cette demande.
- Le « processing » qui définit les méthodes de prévision à utiliser.
- Le « post-processing » synonyme d'évaluation de la performance du modèle choisi.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser ces trois dernières en soulignant les limites des approches existantes pour chacune d'elles. Par la suite, nous dériverons de cette analyse une proposition d'amélioration de ce processus, notamment par la prise en considération du niveau de maturité des pièces, de la proposition d'une méthode hybride de prévision et d'indicateurs permettant une sélection des méthodes de prévision en fonction des risques encourus par la gestion des stocks.

Ce chapitre s'achèvera par une comparaison de la sélection des méthodes de prévisions par différents indicateurs de performances et par différentes classifications de données réelles de pièces de rechange.



## **I. Analyse du processus de prévision en pièces de rechange**

### **a. Etape du pre-processing : Classification des données**

Les caractéristiques liées à la gestion des pièces de rechange que nous avons évoquées auparavant rapprochent la prévision des pièces de rechange d'une catégorie très particulière de demande, appelée demande faible [112]. Cette dernière est couramment caractérisée par le biais de deux indicateurs :

- L'intermittence : qui correspond à l'intervalle de temps, souvent important, entre deux demandes non nulles.
- La variabilité : qui représente la fluctuation des quantités demandées.

Comme le souligne [113] et [114] dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile, et comme nous pouvons le constater au sein de GE Healthcare (domaine des systèmes médicaux), ces indicateurs restent pertinents dans le cas des pièces de rechange. En se basant sur ces derniers, [115] propose une classification des types de demande en pièces détachées afin d'en déduire des règles de sélection de méthodes de prévision et [83] l'affine en proposant l'utilisation de deux seuils :

- Le seuil d'intermittence (ADI - Average non-zero Demand Interval) : correspondant au temps moyen entre l'apparition de deux demandes non nulles.
- Le coefficient de variation (CV) : qui représente la variabilité de la demande et qui est calculé comme le ratio entre l'écart type et la moyenne de la demande.

Dans cette classification, on retrouvera donc 4 grandes classes de demande :

- La demande stable (smooth) : dans ce cas, la fréquence d'apparition d'une demande est plutôt soutenue, et le coefficient de variation de celle-là est plutôt faible,
- La demande erratique (Erratic) : la fréquence d'apparition est comparable à la demande stable mais le coefficient de variation est élevé,
- La demande intermittente (Intermittent) : la fréquence d'apparition est faible tout comme le coefficient de variation,
- La demande Lumpy : la fréquence d'apparition est faible, contrairement au coefficient de variation.

On notera que lorsque la fréquence d'apparition est faible, la demande est souvent dite sporadique.

La figure suivante représente les 4 classes ainsi définies :

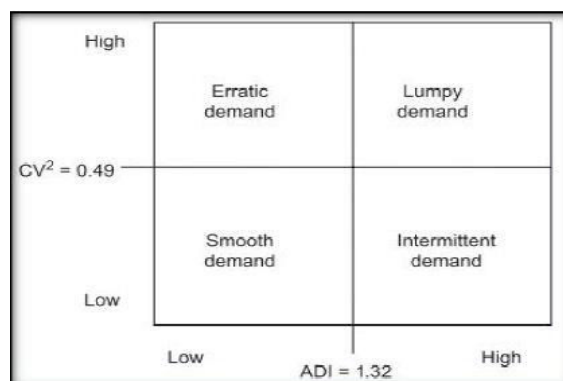


Figure 15: Catégorisation de la demande en pièces de rechanges [83]

Cette classification a été reprise et complétée par [112] qui y a intégré un indicateur de corrélation entre demandes nulles. Ensuite, [116] y a intégré les effets induits par les maintenances, en fonction de leur type (corrective ou préventive).

## b. Etape du processing : prévision de la demande

Dans cette section, nous présentons dans un premier temps les deux types de modèles de prévisions (paramétrique et non paramétrique) rencontrés dans le cadre de demande faible, puis nous détaillerons les principales méthodes paramétriques qui se trouvent être plus adaptées à notre contexte d'étude.

### i. Typologies des méthodes de prévision de pièces de rechange

Les méthodes de prévision pour les pièces de rechange peuvent être classées en deux familles:

- Les méthodes dites paramétriques : ce sont les méthodes les plus étudiées et elles reposent sur une estimation moyenne de la demande [80].
- Les méthodes dites non paramétriques qui reposent, elles, sur une génération discrète de la prévision pour les prochaines périodes en utilisant, par exemple, une approche par apprentissage [86].

#### 1) Les méthodes paramétriques

Les principales méthodes classiques d'estimation reposant sur une approche paramétrique utilisent le principe de moyenne mobile ou pondéré [117] ou le principe de lissage de différents types : simple, double ou triple [118]. Cependant, même si ces méthodes rencontrent un certain succès dans le cas où la demande est stable ou erratique, elles atteignent leur limite dans le cas où elle devient sporadique : cela étant essentiellement dû au fait que ces méthodes n'estiment qu'une quantité et pas une fréquence d'apparition et que, du coup, le poids des demandes nulles entraîne un biais beaucoup trop important. Aussi, de

nouvelles méthodes de prévision ont été élaborées pour prendre en compte ces deux aspects : elles se basent sur une double prévision. La première estime l'intervalle entre deux demandes non nulles et la seconde, la quantité de demande non nulle, amoindissant ainsi l'effet des zéros de l'historique sur la qualité de la prévision. La première d'entre-elles a été introduite sous le nom de méthode de Croston [85], qui est basée sur une technique de lissage. Cette méthode initialement mono-paramétrique a été étendue par [119] qui dissocient le paramétrage de la prévision des intervalles de celui des quantités. Par la suite, après avoir montré que la méthode de Croston était biaisée, [81] proposent une évolution de cette dernière afin de pallier cela : cette évolution est couramment appelée SBA (pour Syntetos and Boylan Approximation). [120] adaptent cette dernière dans le cas où la prévision n'est plus faite par lissage mais par moyenne. Enfin, la méthode de SBA est aussi adaptée dans le cas de la prise en compte du risque d'obsolescence d'inventaire dans l'estimation de la demande [121], ou encore la détermination de la prévision de la demande d'un composant à réparer par agrégation de la prévision de la demande de l'ensemble de ses composés [122].

L'avantage de ces méthodes est leur facilité d'intégration dans la base d'algorithmes classiquement rencontrés dans les outils industriels de gestion des stocks ainsi que leur large utilisation par les outils industriels de prévision. La limite principale de ces travaux reste le développement avec un objectif d'améliorations statistiques sans pour autant considérer les aspects logistiques dans l'évaluation. Ainsi nous proposons dans ce travail de thèse d'évaluer la performance de ces méthodes par des critères de gestion de stocks en utilisant une nouvelle approche de sélection des méthodes de prévision.

## **2) Les méthodes non-paramétriques**

Dans ce cadre on distingue principalement deux types d'approches :

- ✓ L'approche Bootstrapping [86] [123] : cette technique utilise un principe de ré-échantillonnage de l'historique. Ainsi un modèle markovien est construit en calculant les probabilités de transition entre une demande nulle et une autre non-nulle, ce qui permet de prévoir la fréquence de la demande non-nulle sur l'horizon de prévision. Par la suite, les futures demandes non-nulles sont déterminées par ré-échantillonnage des valeurs non-nulles de l'historique.
- ✓ L'approche par réseaux de neurones [87] [124] : cette approche d'auto-apprentissage basée sur des fonctions de combinaison entre des vecteurs d'entrée et de sortie a été adaptée au cas de la demande faible, en utilisant comme vecteurs d'entrée la demande à la dernière période et l'intervalle entre deux demandes tout en gardant les étapes et les fonctions classiques de cette technique.

[125] compare les méthodes paramétriques avec la méthode de Bootstrapping : « *les méthodes paramétriques nécessitent moins de capacité de calcul, ce qui est très important quand il s'agit de prévoir un large nombre de références. Par ailleurs, les méthodes paramétriques nécessitent moins d'expertise et sont plus transparentes* », et conclut après sa comparaison que: « *globalement les méthodes paramétriques performant mieux, on peut se poser la question si la méthode de bootstrapping mérite la complexité ajoutée* ».

En plus de sa complexité intrinsèque, la méthode de réseau de neurones nécessite plus d'historique de données, or l'historique disponible pour les pièces de rechange et la capacité de stockage des outils de prévision pour un large nombre de référence sont souvent limités : « *Des méthodes de réseaux de neurones ont été utilisées pour la faible demande, cependant, ces méthodes ont généralement besoin d'un nombre important d'historique de demande, pour permettre une bonne initialisation, calibration et entraînement de ces modèles* » [126].

Notre environnement de test et d'application industrielle ne permettant pas l'intégration de ces approches non-paramétriques et l'objectif des travaux étant principalement l'amélioration du processus de prévision plutôt que de se concentrer sur l'intégration de nouvelles approches de prévisions, nous nous limitons dans la suite aux méthodes paramétriques, qui seront détaillées dans la section suivante.

## **ii. Modèles paramétriques de prévision**

Dans la suite, nous utiliserons les notations suivantes :

- $D_i$  : est la demande à la période  $i$ .
- $F_i$  : est la prévision pour la période  $i$ , connaissant l'historique de la demande jusqu'à la période  $i - 1$ .

### **1) Méthodes basées sur la moyenne**

#### **✓ Méthode de la moyenne mobile**

Il s'agit de la méthode de prévision la plus classique et la plus ancienne. Elle utilise une moyenne de la demande sur une fenêtre de temps de taille paramétrable  $m$ .

La prévision selon la méthode de la moyenne mobile à  $m$  périodes  $MA - m$ , est :

$$F_i = \frac{[D_{i-1} + D_{i-2} + \dots + D_{i-m}]}{m}$$

Un cas particulier de cette méthode, est connu sous le nom de « la prévision naïve », il s'agit du cas où  $m = 1$ .

#### ✓ Méthode de la moyenne mobile pondérée

Cette technique reprend la méthode précédente en introduisant une pondération aux demandes de l'historique considérée dans la fenêtre de temps. Ainsi, celle-ci est découpée en deux sous-fenêtres de pondérations différentes traduisant l'importance des valeurs historiques s'y trouvant dans la détermination de la nouvelle prévision. Cette méthode utilise donc les trois paramètres suivants :

Le nombre de périodes dites récentes :  $m_1$

Le nombre de périodes dites anciennes :  $m_2$

Le poids de la demande récente :  $\alpha$ , avec  $0 \leq \alpha \leq 1$

La prévision selon de la méthode de la Moyenne Mobile Pondérée est :

$$F_i = \alpha \times \frac{[D_{i-1} + D_{i-2} + \dots + D_{i-m_1}]}{m_1} + (1 - \alpha) \times \frac{[D_{i-m_1-1} + D_{i-m_1-2} + \dots + D_{i-m_2}]}{m_2}$$

## 2) Méthodes basées sur un lissage

#### ✓ Méthode du lissage simple

C'est l'une des méthodes les plus utilisées et connues dans le domaine de la prévision. Sa notoriété est due à la fois à sa simplicité et sa bonne performance [127] [128].

Le principe de la méthode est de combiner la dernière demande réelle avec la dernière prévision, la dernière prévision étant également le résultat des précédentes demandes et prévisions. Ainsi, cette dernière prévision agrège l'ensemble des informations précédentes, on peut donc alléger la base de données contrairement à la moyenne mobile ou la moyenne mobile pondérée qui font appelle à chaque période à un historique plus important.

Cette méthode utilise un poids de lissage  $\alpha$  avec :  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

La prévision selon la méthode du lissage simple est :

$$F_i = \alpha \times D_{i-1} + (1 - \alpha) \times F_{i-1}$$

Depuis, plusieurs variantes du lissage simple ont été proposées avec différents paramétrages. Aussi, un état de l'art sur l'ensemble des méthodes de lissage a été réalisé [118].

#### ✓ Méthode du lissage double

Le principe de cette méthode est de reproduire le lissage présenté ci-dessus une seconde fois. Ainsi, le premier lissage est une étape intermédiaire qui sera considérée comme la nouvelle demande pour le second lissage.

Elle utilise donc deux poids différents et une prévision intermédiaire :

$\alpha$  le poids du premier lissage avec  $0 \leq \alpha \leq 1$

$\beta$  le poids du second lissage avec :  $0 \leq \beta \leq 1$

$E_i$  la prévision intermédiaire pour la période  $i$  (premier lissage)

La prévision avec la méthode de lissage double est calculée ainsi :

$$E_i = \alpha \times D_{i-1} + (1 - \alpha) \times E_{i-1}$$

$$F_i = \beta \times E_{i-1} + (1 - \beta) \times F_{i-1}$$

#### ✓ Méthode de lissage avec tendance : Méthode de Holt

Cette méthode s'appuie sur la méthode du lissage double en y intégrant une composante liée à la tendance de la demande [129]. Ainsi, le premier lissage permet d'estimer le niveau des prévisions, et le second de prendre en compte les effets tendanciels.

Notons :

$\alpha$  le poids du lissage du niveau de prévision  $0 \leq \alpha \leq 1$

$\beta$  le poids du lissage de la pente de prévision  $0 \leq \beta \leq 1$

$B_i$  la prévision du niveau pour la période  $i$

$A_i$  la prévision de la pente pour la période  $i$

La prévision avec la méthode de Holt pour la période  $i + k$  est calculée ainsi :

$$B_i = \alpha \times D_{i-1} + (1 - \alpha) \times (B_{i-1} + A_{i-1})$$

$$A_i = \beta \times (B_i - B_{i-1}) + (1 - \beta) \times A_{i-1}$$

$$F_{i+k} = B_i + k \times A_i$$

#### ✓ Méthode de lissage triple : Méthode Holt-Winters

Cette méthode étend la méthode de Holt pour considérer en plus les effets de saisonnalité dans les séries chronologiques [130] : la prévision est dans ce cas multipliée par des indices de saisonnalité, dans le cas d'une périodicité mensuelle l'indice de chaque mois est calculé en utilisant la demande des mois équivalents des années précédentes.

Il s'agit d'une méthode de lissage triple : le premier est celui de la prévision du niveau de la demande, le deuxième est celui de la prévision de la pente, le troisième est celui de la saisonnalité.

En plus des notations de la méthode de Holt, on note:

$\gamma$  le poids de saisonnalité avec :  $0 \leq \gamma \leq 1$

$p$  la périodicité de saisonnalité (souvent annuelle  $p=12$ )

$S_i$  la prévision de l'indice de saisonnalité pour la période  $i$

La prévision du niveau, de la pente et de l'indice de saisonnalité sont les suivantes :

$$B_i = \alpha \times (D_{i-1} - S_{i-p}) + (1 - \alpha) \times (B_{i-1} + A_{i-1})$$

$$A_i = \beta \times (B_i - B_{i-1}) + (1 - \beta) \times A_{i-1}$$

$$S_{i+k} = \gamma \times (D_{i-1} - B_{i-1}) + (1 - \gamma) \times S_{i+k-p}$$

La prévision finale avec la méthode de Holt-Winters pour la période  $i + k$  est calculée selon différentes combinaisons déterminées en fonction des propriétés des saisonnalités détectées dans l'historique.

La prévision par la combinaison associative la plus classique de la méthode Holt-Winters est:

$$F_{i+k} = B_i + k \times A_i + S_{i+k}$$

### 3) Méthodes basées sur la séparation quantité/intervalle

#### ✓ Méthode de Croston

Cette méthode est la plus communément utilisée en présence de demande sporadique, ce succès étant dû à son efficacité dans ce cas. Le principe de la méthode est d'effectuer d'une part une prévision de la quantité demandée par le biais d'un lissage ne prenant en historique que les demandes non nulles et d'autre part une prévision, par lissage également, de la taille de l'intervalle entre deux demandes non nulles, ces deux lissages étant effectués de façon indépendante.

Cette spécificité permet d'exploiter ces deux résultats séparément en cas de besoin de prévisions séparées, ou de les combiner en dernière étape en cas de besoin d'une prévision unique.

Notons :

$\alpha$  le poids de la prévision de la quantité avec  $0 \leq \alpha \leq 1$

$\beta$  le poids de la prévision de l'intervalle avec  $0 \leq \beta \leq 1$

$S_i$  la prévision de la quantité pour la période  $i$

$I_i$  la prévision de l'intervalle pour la période  $i$

$q_i$  compteur d'intervalle à la période  $i$ .

La prévision selon la méthode de Croston pour la période  $i + k$  est calculée comme suit:

**Si** ( $D_{i-1} = 0$ )

$$S_i = S_{i-1}$$

$$I_i = I_{i-1}$$

$$q_i = q_{i-1} + 1$$

**Sinon**

$$S_i = \alpha \times D_{i-1} + (1 - \alpha) \times S_{i-1}$$

$$I_i = \beta \times q_{i-1} + (1 - \beta) \times I_{i-1}$$

$$q_i = 1$$

**Fin Si**

**Si** ( $k \bmod I_i = 0$ )

$$F_{i+k} = S_i$$

**Sinon**

$$F_{i+k} = 0$$

**Fin Si**

#### ✓ Méthode de SBA

La référence [83] montre que considérer une indépendance entre l'historique de la demande non nulle et l'historique des intervalles entre deux demandes non nulles induit un biais : cette hypothèse est forte car l'effet de la corrélation entre ces deux paramètres dans une série temporelle ne doit pas être négligé. Ainsi, les auteurs proposent une évaluation de ce biais et modifie la méthode de Croston pour en tenir compte. Cette nouvelle méthode porte le nom de l'Approximation de Syntetos et Boylan (SBA).

La prévision selon la méthode SBA pour la période  $i + k$  reprend le même algorithme que la méthode de Croston mais remplace la dernière phase conditionnelle par celle-là:

**Si** ( $k \bmod i = 0$ )

$$F_{i+k} = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \times S_i$$

**Sinon**

$$F_{i+k} = 0$$

**Fin Si**

où  $\alpha$  représente le coefficient correcteur déterminé par l'évaluation du biais.



### c. Etape du post-processing : Mesures de précision des méthodes de prévision

La plupart des articles utilisant les méthodes citées ci-dessus, évalue la performance de la méthode proposée en comparaison avec des méthodes classiques sur la base des mesures de précision statistiques (cf. Tableau 5).

Différentes mesures ont été proposées afin d'évaluer la performance statistique de ces méthodes [131], [132]. Il est aussi recommandé de combiner ces mesures statistiques [112]. En effet, le choix de la mesure de comparaison n'est pas anodin car il peut impacter lourdement les proportions de sélection de la méthode de prévision. Par exemple une méthode peut avoir tendance à surestimer la demande, une autre à la sous-estimer, la sélection dépendra donc de la priorisation dans la mesure utilisée.

Intitulé de la mesure	Abréviation	Formule
Mean Squared Error	MSE	$\sum_{i=1}^N \frac{(F_i - D_i)^2}{N}$
Mean Absolute Deviation	MAD	$\sum_{i=1}^N \frac{ F_i - D_i }{N}$
Mean Absolute Percent Error	MAPE	$\sum_{i=1}^N \frac{ F_i - D_i }{N \cdot \max(D_i, 1)} \times 100\%$

Tableau 5: Mesures de précision classiques des méthodes de prévision

Ainsi, on peut résumer le processus classique de prévision en pièces de rechange détaillé ci-dessus selon la figure suivante:

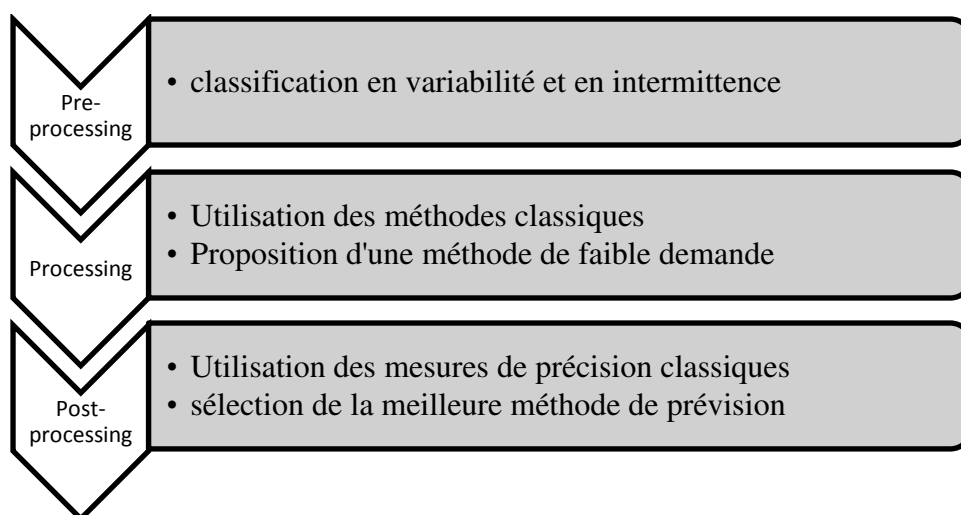


Figure 16: Processus classique de prévision en pièces de rechange

#### **d. Limites du processus classique de prévision en pièces de rechange**

Dans cette partie, nous détaillons les limites du processus classique de prévision et ceci, étape par étape.

##### **i. Etape de pre- processing**

S'il existe une littérature qui définit les différentes classifications des pièces de rechange utilisées pour le processus de gestion des stocks [105], il n'existe pas de travail équivalent dans le cadre du processus de prévision. Il convient donc d'enrichir ce processus par un travail de rassemblement des différentes classifications qui peuvent avoir un impact sur les résultats de ce processus.

De plus, la demande en pièce détachée est susceptible d'évoluer dans le temps en fonction de la maturité de la pièce considérée. Il est donc également important de tenir compte de cette évolution en fonction du cycle de vie de la pièce en question.

##### **ii. Etape de Processing**

Les combinaisons entre les méthodes paramétriques de prévision n'ont pas été réalisées dans la littérature, or ceci peut améliorer la qualité des prévisions car une telle technique permet souvent de combiner différentes caractéristiques de méthodes qu'on hybride. Aussi nous nous proposons de tester différentes hybridations de méthodes et d'en tester les performances.

##### **iii. Etape de Post-processing**

Durant cette étape, les résultats des méthodes utilisées sont comparés grâce à une mesure souvent purement statistique. Cependant, l'utilisation d'une telle mesure ne traduit pas forcément l'objectif visé qui se trouve être l'amélioration de la performance du processus de gestion de stock. Aussi, envisager plusieurs mesures pouvant traduire cet objectif apparaît comme potentiellement intéressant pour une sélection adéquate de la méthode de prévision à utiliser.

Ainsi, l'objectif de la suite de ce chapitre est de détailler les propositions d'améliorations pour chacune de ces trois étapes.

## II. Propositions d'améliorations du processus de prévision en pièces de rechange

Dans cette section nous présentons les améliorations que nous apportons pour chaque étape du processus de prévision.

### a. Etape du pré-processing: Extension des critères considérés

Cette étape correspond à la phase de préparation des données en vue d'y appliquer les algorithmes de prévision idoines. Cependant, bien souvent, cela se borne à utiliser une classification du type de demandes et de pièces en négligeant d'autres aspects pourtant primordiaux comme la définition du type d'historique à utiliser ainsi que sa taille. Aussi, nous proposons d'étendre cette phase de pré-processing pour prendre en compte ces aspects comme le présente la figure 17.

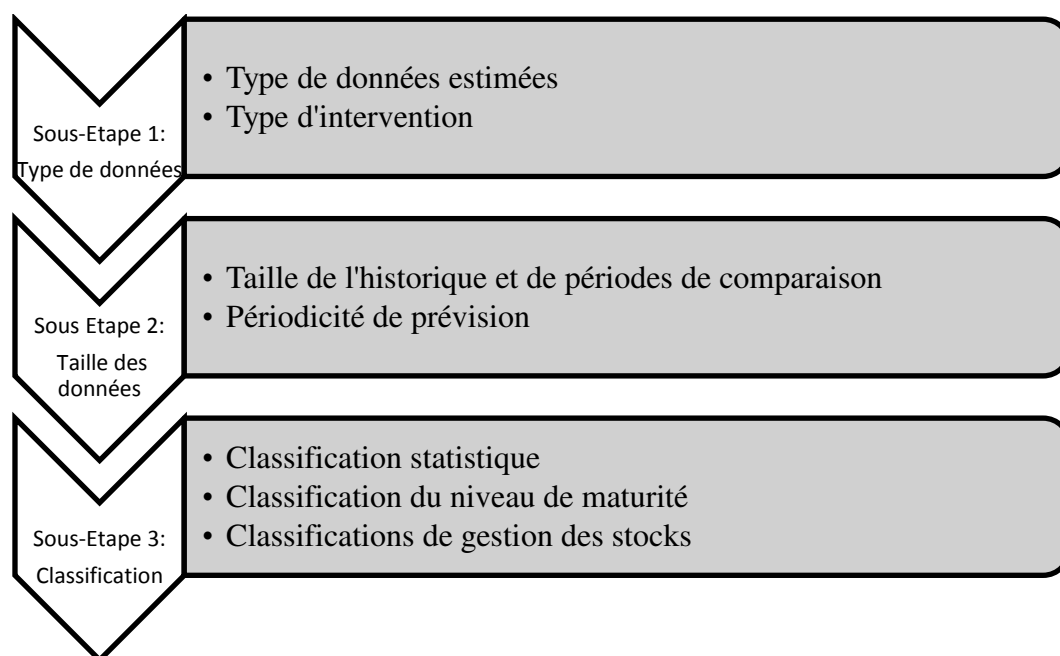


Figure 17: Nouvelle étape du pré-processing

L'étape du pré-processing est donc divisée séquentiellement en trois sous étapes:

- Sous-étape 1 : on choisit **le type de données** à estimer. Ainsi, nous décrivons dans cette partie les types de prévision que peut couvrir les stocks d'une chaîne logistique en pièces de rechange.
- Sous-étape 2 : on choisit **la taille** des données d'entrées: ceci inclut la taille d'historique à utiliser, la taille de comparaison entre les modèles, ainsi que la périodicité de prévision.
- Sous-étape 3 : nous listons l'ensemble des critères des pièces de rechange qui peuvent avoir une influence sur la prévision et nous définissons une classification adéquate pour notre problématique. Lors de la prévision d'une référence en pièce de rechange (processing), cette classification ne permettra pas seulement de sélectionner les méthodes

de prévision à tester pour cette référence, mais aussi d'utiliser les données des références similaires (de la même classe), de définir la procédure de sélection de la meilleure méthode de prévision et de désigner les mesures adaptées à cette référence.

### i. Sous étape 1 : Type de données

Dans cette partie, nous détaillons les types de données utilisables pour le pré-processing. Ceux-ci sont axés sur les types de demande générée et d'intervention requise.

#### ✓ Type de la demande générée

On peut distinguer principalement quatre types de génération de demande :

- **La demande réelle** des techniciens de maintenance qui représentent l'ensemble des commandes placées par les techniciens de maintenance pour la référence étudiée.
- **La consommation** c'est-à-dire l'estimation des pièces directement utilisées pour la réparation d'un produit.
- **Les retours** des techniciens suite à la non-utilisation d'une pièce : cela consiste à estimer les flux retours des techniciens de maintenance suite à des non consommations des pièces, ces retours alimentent les stocks, évitant des achats de pièces supplémentaires.
- **La productivité** : Les estimations des flux de productivités en pièces de rechange font référence à la création de valeur ajoutée en pièces sans avoir besoin d'en acheter de nouvelles chez les fournisseurs. Ceci peut inclure les possibilités de réparations en interne des pièces, la récupération de pièces des anciens systèmes remises à neuf, l'échange des pièces défectueuses sous garantie...

#### ✓ Type d'intervention

L'approche classique de prévision consiste à utiliser une seule prévision qu'elle que soit le type d'intervention, une autre approche pourrait séparer les données en type d'intervention dans cette estimation ainsi on peut distinguer :

- L'intervention pour **installation**, qui est relative aux remplacements des pièces lors de l'installation de systèmes. Souvent, il ne s'agit pas d'une panne d'utilisation du système, mais d'un dysfonctionnement dû à des problèmes de manutention ou de mise en place.
- L'intervention pour **maintenance corrective**, qui est relative aux remplacements des pièces suite à des pannes.

- L'intervention pour **maintenance préventive systématique**, qui relève du remplacement de pièces sur la base de conditions temporelles.

Ces différents types d'interventions ont des degrés de difficultés d'estimation différents. Par exemple, l'estimation de la périodicité de la demande est plus facile dans le cas de maintenances préventives que pour celui de la maintenance corrective. De plus, cela peut induire des exigences différentes quant à la disponibilité de pièces.

## ii. Sous étape 2 : Taille des données

Après avoir défini les types de données à utiliser dans le processus de prévisions, l'étape suivante consiste à définir la taille des données à utiliser dans les modèles de prévisions ainsi que dans les comparaisons, ceci peut inclure la définition de :

- La taille **M** de l'historique à utiliser dans les algorithmes de prévision,
- La taille **N** de simulation du comportement de la prévision par rapport à la demande pour l'évaluation de performance.
- La périodicité **P** de la prévision : Mensuelle, Trimestrielle, Annuelle.

## iii. Sous étape 3 : Classification d'une pièce de rechange

Plusieurs classifications peuvent être utilisées dans le cas des pièces de rechange. En effet une classification peut être utilisée du moment où elle s'avère pertinente, c'est-à-dire si elle a un impact sur le profil des données, sur les résultats des prévisions, sur la sélection des modèles de prévision.

Contrairement à la littérature qui se limite souvent à une classification statistique pour sélectionner un ensemble de méthodes de prévision, nous listons ici d'autres types de classification qui peuvent fortement influencer cette sélection comme le niveau de maturité de la pièce dans son cycle de vie ou encore des critères liés à la gestion du stock (comme le coût de la pièce par exemple).

### ✓ Classifications statistiques

Plusieurs types de classifications statistiques peuvent être distingués. Elles sont obtenues par une analyse statistique de l'historique de la demande. On retrouve les critères suivants :

- **Importance de la demande** : Demande importante/Demande moyenne/ Demande faible

- **Corrélation de la demande** : Corrélation forte/Corrélation faible /Corrélation positive/Corrélation négative. Cette classification est mesurée par le coefficient de corrélation.
- **Intervalle de la demande** : intervalle entre deux demandes non-nulles important/ intervalle entre deux demandes non-nulles faible (Mesuré par ADI).
- **Variabilité de la demande** : Demande variable/Demande stable. (Mesuré par CV).

#### ✓ **Classification par niveau de maturité des pièces**

Le profil de la demande peut changer significativement en fonction du niveau de maturité de la référence. Aussi, une classification prenant en compte ces aspects-là peut être nécessaire. On retrouve principalement les trois phases de maturité suivante : **phase d'introduction, Maturité, Fin de vie.**

#### ✓ **Base installée**

L'importance de la base installée (nombre de produits vendus pour un système donné) a une influence non négligeable sur la fréquence et l'importance de la demande en pièces de rechange pour ce dernier. De plus, la phase de vie de la commercialisation du système peut également jouer un rôle très impactant sur le profil de la demandé généré. Pour finir, le degré d'innovation d'une nouvelle base installée peut influencer la demande en pièces de rechange. On peut donc introduire les trois classifications suivantes :

- **Catégories de base installée** : Base importante, Base Moyenne, Base faible.
- **Catégories de phase de vie du produit** : Lancement, Saturation, Déclin.
- **Niveau d'innovation de la base installée** : Elevé, Moyen, Pas d'innovation.

#### ✓ **Caractéristiques de gestion de stocks**

Ces caractéristiques permettent normalement de définir les paramètres des modèles de gestion de stocks. Habituellement, ils n'interviennent qu'à partir du processus de gestion de stocks. Cependant, en considérant notre objectif de construire une approche de sélection orientée gestion des stocks, il semble logique de les faire intervenir dans le processus de prévision. Ainsi, ils auront un impact selon les priorités qu'ils traduisent en stocks ou en niveau de service ce qui traduira mieux les objectifs que nous nous sommes fixés en termes de performance de gestion des stocks.

Parmi ces classifications on peut distinguer par exemple :

- **Classification du prix de la pièce de rechange** : Classification coût (A/B/C).
- **Classification de la criticité de la pièce pour le système** : Vitale/Essentielle/Désirable (VED).

Ces classifications de gestion de stocks seront détaillées dans le chapitre 5 qui va présenter le processus de gestion des stocks, incluant l'étape de classification en gestion des stocks. Le tableau 6 résume les catégories des classifications citées ci-dessus :

Classifications	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4
<b>Importance de la demande</b>	Faible	Moyenne	Importante	
<b>Coefficient de corrélation</b>	Faible négative	Faible positive	Forte négative	Forte positive
<b>Statistique (retenue ADI/CV)</b>	Stable	Intermittente	Lumpy	Erratique
<b>Niveau de maturité</b>	Introduction	Mature	Fin de vie	
<b>Classification technique 1 (coût)</b>	A	B	C	
<b>Classification technique 2 (criticité)</b>	Vitale	Essentiel	Désirable	
<b>Base installée</b>	Faible	Moyenne	Importante	
<b>Cycle de vie de la base installée</b>	Lancement	Saturation	Déclin	
<b>Niveau d'innovation</b>	Pas d'innovation	Légère	Elevée	

**Tableau 6: Résumé des classifications pour la prévision en pièces de rechange**

Les seuils entre les catégories des classifications retenues sont déterminés soit sur la base de seuils suggérés dans la littérature, soit par des résultats d'expérimentations.

## **b. Proposition d'amélioration de l'étape de Processing : Méthodes hybrides**

### **i. Pourquoi une méthode de prévision hybride ?**

Une hybridation des prévisions permet une combinaison des caractéristiques des méthodes de prévisions utilisées dans cette démarche. Par exemple, elle peut combiner entre les résultats du principe de lissage d'une méthode avec ceux du principe de moyenne d'une autre. Par

ailleurs, dans la plupart des cas, il n'existe pas de méthode qui surclasse complètement les autres. Ainsi, cette combinaison pourra permettre de renforcer la meilleure méthode par la performance des autres.

## ii. Les deux méthodes d'hybridation proposées

Dans cette partie, nous proposons deux méthodes permettant d'hybrider  $N$  méthodes de prévision.

Dans la suite nous utiliserons les notations données dans le tableau 7 :

Notation	Signification
$N$	: Nombre de méthodes de prévision à hybrider
$H$	: Taille (en nombre de périodes) de l'historique utilisé
$D_t$	: Demande à la période $t \in \llbracket 1, H \rrbracket$
$F_i^{(j)}(t)$	: Prévision effectuée à la date $j$ pour la période $t$ par la méthode de prévision $i, (i, t) \in \llbracket 1, N \rrbracket \times \llbracket 1, H + 1 \rrbracket$
$SE_i(t)$	: Erreur calculée à la période $t$ par la méthode de prévision $i, (i, t) \in \llbracket 1, N \rrbracket \times \llbracket 1, H \rrbracket$

Tableau 7: notation commune aux deux méthodes d'hybridation

### ✓ Méthode d'hybridation 1

Le principe de la méthode consiste à affecter un poids non nul à chaque méthode en fonction de sa performance sur chaque période de l'historique. L'utilisation de ces poids permettra de combiner l'ensemble des méthodes qui ont été dominantes sur au moins une période. On utilisera les notations supplémentaires suivantes (Tableau 8).

Notation	Signification
$P_i$	: Poids accordé à la méthode de prévision $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$

Tableau 8: Notation pour la méthode d'hybridation 1

Le pseudo code suivant décrit la façon d'évaluer le poids de chaque méthode de prévision :

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

$$P_i = 0$$

**Fin Pour**

**Pour**  $t$  allant de 1 à  $H$

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

$$SE_i(t) = [F_i(t) - D_t]^2$$

**Fin Pour**

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

Meilleur=vrai



**Pour**  $j$  allant de 1 à  $N$   
**Si**  $(SE_i(t) > SE_j(t))$  **alors**  
Meilleur=faux

**Fin Si**

**Fin Pour**

**Si** Meilleur **alors**

$$P_i = P_i + \frac{1}{H}$$

**Fin Si**

**Fin Pour**

**Fin Pour**

La prévision obtenue par la méthode hybride 1 (Hy 1) à la période  $H$  pour la période  $H + t$  est :

$$F_{Hy1}^{(H)}(H + t) = \sum_{i=0}^N P_i F_i(H + t)$$

### ✓ Méthode d'hybridation 2

Pour cette méthode, nous introduisons un effet mémoire en définissant des probabilités de transitions d'une méthode à une autre. C'est-à-dire que, contrairement à la méthode précédente, nous tenons compte pour chaque période de l'historique de la performance de chaque méthode à cette période mais aussi à la période précédente et nous dénombrons le nombre de fois où il y a une transition d'une méthode à l'autre en termes de dominance.

On utilisera les notations supplémentaires suivantes (Tableau 9)

Notation	Signification
$P_{ij}$	: Probabilité de transition des méthodes de prévision $i$ à $j, (i, j) \in \llbracket 1, N \rrbracket^2$
$N_{ij}$	: Compteur de transition des méthodes de prévision $i$ à $j, (i, j) \in \llbracket 1, N \rrbracket^2$

**Tableau 9: Notation pour la méthode d'hybridation 2**

Le pseudo code suivant décrit la façon d'évaluer les différentes probabilités de transition :

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

**Pour**  $j$  allant de 1 à  $N$

$$N_{ij} = 0$$

**Fin Pour**

**Fin Pour**

**Pour**  $t$  allant de 1 à  $H$

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

$$SE_i(t) = [F_i(t) - D_t]^2$$

**Fin Pour**

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

**Pour**  $j$  allant de 1 à  $N$

**Si**  $\left[ \left( SE_i(t) \leq SE_j(t) \right) \textbf{ ET } \left( SE_i(t-1) \leq SE_j(t-1) \right) \right]$

**Alors**

$$N_{ii} = N_{ii} + 1$$

**Sinon**

**Si**  $\left[ \left( SE_i(t) \leq SE_j(t) \right) \textbf{ ET } \left( SE_i(t-1) > SE_j(t-1) \right) \right]$

**Alors**

$$N_{ji} = N_{ji} + 1$$

**Sinon**

**Si**  $\left[ \left( SE_i(t) > SE_j(t) \right) \textbf{ ET } \left( SE_i(t-1) \leq SE_j(t-1) \right) \right]$

**Alors**

$$N_{ij} = N_{ij} + 1$$

**Sinon**

$$N_{jj} = N_{jj} + 1$$

**Fin Si**

**Fin Si**

**Fin Si**

**Fin Pour**

**Fin Pour**

**Fin Pour**

**Pour**  $i$  allant de 1 à  $N$

**Pour**  $j$  allant de 1 à  $N$

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{k=1}^N N_{ik}}$$

**Fin Pour**

**Fin Pour**

Pour obtenir la prévision par la méthode hybride 2 à la période  $H + t$ , on se base sur la méthode  $j$  qui a été la mieux évaluée sur la période  $H$  (le plus faible  $SE_j(H)$ ) on calculera :

$$F_{Hy2}^{(H)}(H + t) = \sum_{i=0}^N P_{ji} F_i^{(H)}(H + t)$$

#### ✓ Illustrations des deux méthodes :

Dans cette section, nous nous proposons d'illustrer les effets de ces deux méthodes en utilisant deux exemples simples.

Exemple 1 : Nous prenons le cas d'une pièce A sur un historique de 5 mois (Janvier à Juin). Nous connaissons également les prévisions qui ont été faites sur l'historique et nous étudions le comportement de la méthode d'hybridation 1.

Le tableau 10 synthétise les données d'entrée considérées.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun
<b>Demandes</b>	4	5	4	6	4	5
<b>Prévisions Méthode 1</b>	3	4	4	4	3	3
<b>Prévisions Méthode 2</b>	6	5	5	5	7	6

**Tableau 10: Données d'entrée pour l'illustration 1**

Si nous évaluons par un indicateur statistique classique (MSE) les deux prévisions nous obtenons  $MSE_1 = 1,83$  et  $MSE_2 = 2,66$  ce qui indique une dominance de la méthode 1. Cependant, on constate que la prévision 1 a tendance à sous-estimer la demande, contrairement à la prévision 2. Utilisons désormais la méthode hybride 1 dont les résultats sont donnés au tableau 11.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun
<b><math>P_1</math></b>	1	1	0.5	0.67	0.5	0.6
<b><math>P_2</math></b>	0	0	0.5	0.33	0.5	0.4
<b>Prévisions Méthode Hybride 1</b>	3	4	4	4	5	4

**Tableau 11: Résultat obtenu par la méthode hybride 1**

En calculant les indicateurs statistiques obtenue, on a  $MSE_{Hyb1} = 1,33$ . On voit qu'on a pu sensiblement améliorer la qualité de la prévision et, en analysant les résultats, on remarque une diminution des tendances à la sous-estimation ou à la surestimation.

Exemple 2 : Nous prenons le cas d'une pièce B sur un historique de 5 mois (Janvier à Juin). Dans cet historique, on remarque une forte augmentation de la demande sur les deux dernières périodes. Nous connaissons également les prévisions qui ont été faites sur l'historique et nous étudions le comportement de la méthode d'hybridation 2.

Le tableau 12 synthétise les données d'entrée considérées.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun
<b>Demandes</b>	3	2	3	4	8	10
<b>Prévisions Méthode 1</b>	2	2	1	3	5	6
<b>Prévisions Méthode 2</b>	7	5	5	5	7	8

**Tableau 12: Données d'entrée pour l'illustration 2**

Si nous évaluons par un indicateur statistique classique (MSE) les deux prévisions nous obtenons  $MSE_1 = 5,66$  et  $MSE_2 = 6,66$  ce qui indique une dominance de la méthode 1. On devrait donc naturellement privilégier celle-là. Cependant, on constate que la prévision 1 a tendance à sous-estimer la demande, contrairement à la prévision 2 mais que cette dernière a mieux réagi à la brusque augmentation de la demande. Utilisons désormais la méthode hybride 2 dont les résultats sont donnés au tableau 13.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun
$N_{11}$	0	1	2	3	3	3
$N_{12}$	0	0	0	0	1	1
$N_{21}$	0	0	0	0	0	0
$N_{22}$	0	0	0	0	0	1
$P_{11}$	1	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.75</b>	0.75
$P_{12}$	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.25</b>	0.25
$P_{21}$	0	0	0	0	0	<b>0</b>
$P_{22}$	0	0	0	0	0	<b>1</b>
<b>Prévisions Méthode Hybride 2</b>	2	2	1	3	6	8

**Tableau 13: résultat obtenu par la méthode d'hybridation 2**

En calculant les indicateurs statistiques obtenue, on a  $MSE_{Hyb2} = 2,33$ . On voit qu'on a également sensiblement amélioré la qualité de la prévision et, en analysant les résultats, on remarque une diminution des tendances à la sous-estimation ou à la surestimation. De plus, on remarque que la méthode hybride s'est adaptée aux variations fortes de la demande.

### c. Etape du post-processing : Mesures de sélection des méthodes de prévision

#### i. Approche de sélection 1 : approche classique par des mesures statistiques

Tous les indicateurs décrits précédemment dans ce chapitre s'appuient essentiellement sur une analyse statistique des écarts entre la demande réelle et la prévision générée par la méthode utilisée. Ainsi, une méthode de prévision pourra être préférée à d'autres en s'appuyant sur une ou plusieurs de ces mesures ; et les prévisions générées par cette méthode pourront être utilisées comme données d'entrée du processus de gestion de stock comme l'illustre la Figure 18.

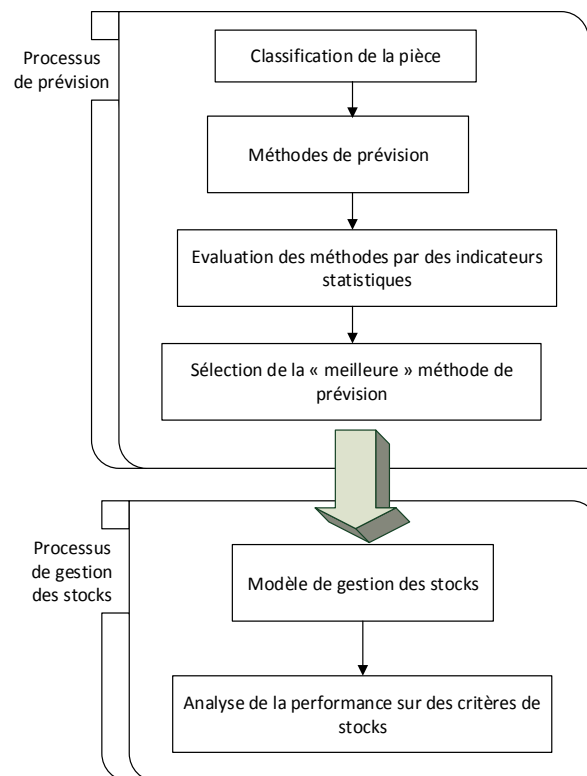


Figure 18: Approche classique d'évaluation de la performance des méthodes de prévision

Cependant, il est important de noter que dans cette configuration, les prévisions générées ne sont pas remises en cause au niveau du processus de gestion de stock (elles en sont des données d'entrées) et servent également au paramétrage du modèle de gestion de stock (au travers, par exemple, de la détermination d'un niveau de stock de sécurité). Aussi, il est clair que la performance de la prévision contribue fortement à l'atteinte des objectifs du processus de gestion des stocks. Outre l'importance du choix des mesures de performances pour la sélection de la méthode de prévision, on peut donc se poser la question de l'impact de l'absence de prise en compte de la performance du processus de gestion de stocks dans cette sélection.

Dans la suite, nous détaillons de nouvelles approches de sélection que nous proposons pour pallier ce problème. La première méthode qui sera présentée dans ce chapitre consistera à élaborer des indicateurs de performance pour la prévision intégrant les risques en sur la gestion de stocks. Après avoir introduit les modèles de gestion des stocks en chapitre 5, nous proposerons dans le chapitre 6, une intégration complète des processus de sélection de la prévision et de gestion des stocks.

## **ii. Approche de sélection 2 : Mesures de performance des méthodes de prévision orientées gestion des stocks**

Dans cette partie, nous reprenons le schéma classique présenté dans la figure 18 et nous définissons de nouveaux indicateurs de performance de la méthode de prévision intégrant des composantes orientées gestion des stocks.

Dans les approches classiques de gestion des stocks, les erreurs liées à la prévision sont compensées par la détermination d'un niveau de stock de sécurité qui dépend d'une part, de l'erreur de prévision de la demande proprement dite, et d'autre part, de la variabilité du délai d'obtention des produits devant être réapprovisionnés. Nous partons donc de ces considérations afin de proposer les deux nouvelles mesures suivantes :

### **✓ Mesure des risques de la prévision sur la gestion des stocks**

Dans les indicateurs statistiques que nous avons pu voir précédemment, la précision de la prévision est mesurée soit en moyenne quadratique, soit en écart absolu moyen. Ainsi, on essaye de bien analyser une distance de la prévision à la demande réelle. Cependant en gestion des stocks, estimer l'erreur de prévision n'est pas forcément suffisant : en effet, il est également important de savoir si cette dernière excède généralement la demande (et dans ce cas, on risque une inflation des stocks) ou si elle lui est inférieure (et là, ce sont des backorders qu'on risque de générer). Aussi, nous proposons une nouvelle mesure qui sera la combinaison convexe de deux indicateurs reflétant l'un le dépassement de la demande réelle et l'autre sa sous-estimation. Pour les présenter, nous reprenons les notations utilisées dans la section II.

Comme indicateur reflétant le risque de génération de stock, nous définissons le Mean Positive Error (MPE) ( $H$  désigne la taille de l'historique):

$$MPE = \sum_{t=1}^H \frac{\max(0, F_t - D_t)^2}{H}$$

Comme indicateur reflétant le risque de génération de backorder, nous définissons le Mean Negative Error (MNE) :

$$MNE = \sum_{t=1}^H \frac{\max(0, D_t - F_t)^2}{H}$$

Ainsi, nous définissons une mesure que nous appelons Inventory Orientation Error (IOE), comme combinaison convexe de ces deux composantes :

$$IOE_{\lambda} = \lambda \cdot MPE + (1 - \lambda) \cdot MNE$$

Selon la valeur de  $\lambda$ , la mesure reflétera les orientations voulues par les décideurs, ou selon la classification de la pièce:

- Si  $\lambda < 0,5$ , alors un accent est mis sur la continuité de service (on cherchera à diminuer les backorders).
- Si  $\lambda > 0,5$ , alors c'est le risque de sur-stockage qui sera pointé.
- Si  $\lambda = 0,5$ , nous retrouvons la mesure MSE.

#### ✓ **Mesure intégrant le délai d'approvisionnement**

Dans les mesures de performance des prévisions que nous avons pu rencontrer dans la littérature, ainsi que celles que nous avons présentées précédemment, les prévisions et les demandes réelles sont comparées période par période. Or, en gestion de stock, les ordres de fabrication ou d'achat sont souvent effectués par lots afin de minimiser les coûts logistiques afférents. Or, la taille de ce lot couvre généralement la demande qui peut intervenir durant le délai d'approvisionnement du produit considéré. Il est donc important de mesurer la justesse de la prévision agrégée sur ce délai d'approvisionnement par rapport à la demande réelle, afin de s'assurer que les quantités commandées couvrent bien la demande réelle. Aussi nous proposons une nouvelle mesure appelée Lead Time Forecast Error (LTFE) que nous calculons de la manière suivante :

$$LTFE = \frac{1}{H - LT + 1} \sum_{t=1}^{H-LT+1} \left[ \sum_{k=0}^{L-1} (F_{t+k}^{(i)} - D_{t+k}) \right]^2$$

Où :

- $F_t^{(i)}$  est la prévision telle qu'elle était annoncée en début de la période  $i$  pour la période  $t$ .
- $L$  désigne le temps d'approvisionnement
- $H$  est le nombre de périodes de comparaison des prévisions avec les demandes réelles.

### **III. Expérimentation du nouveau processus sur données réelles**

#### **a. Plan d'expérience**

Dans cette partie nous définissons le plan d'expérience suivi

##### **i. Etape du pré-processing**

###### **✓ Sous-étape 1 : Types des données**

**Les données estimées :** nous utilisons les données de la demande réelle en pièces de rechange.

**Les types d'intervention :** On ne va pas séparer dans cette étude entre les types d'intervention de la demande ; pour notre cas une demande en pièce de rechange peut être donc due à un besoin en maintenance préventive ou corrective.

###### **✓ Sous-étape 2 : Taille des données**

**Historique utilisé :** nous utilisons un historique de  $M=36$  mois de demande. Les 12 premiers mois serviront d'historique pour le calibrage des différentes méthodes. Les demandes sur les  $N=24$  derniers mois serviront pour l'analyse et la comparaison des méthodes.

**Périodicité de prévision :** nous utilisons une périodicité classique d'actualisation des prévisions dans le cas des pièces de rechange de  $P=1$  mois.

###### **✓ Sous-étape 3 : classifications**

###### **• Les classifications retenues**

Nous utilisons les classifications suivantes :

- La classification statistique de la demande
- La classification de la maturité de la pièce
- Les classifications en gestion de stocks pour donner des priorités stock/service

La nouveauté des classifications retenues par rapport aux expérimentations classiques de la littérature est la suivante :



Dans notre cas, nous utilisons aussi la classification de la maturité de la pièce, nous testerons la sélection de la méthode en fonction du niveau de maturité.

Dans notre cas, nous utilisons aussi les classifications en gestion des stocks de la pièce comme sa criticité ou son prix, ceci permettra de juger le poids à donner par les décideurs aux mesures de sélection.

- **Les seuils des classifications**

- **La classification statistique de la demande :**

Pour cette classification, nous retenons les seuils suggérés par la littérature [83].

Pour le seuil d'intervalle de la demande :  $ADI=1.33$

Il sépare entre des demandes à fréquence importante et des demandes à fréquence faible.

Pour le seuil de variabilité de la demande :  $CV2=0.49$

Il sépare entre des demandes à variabilité faible et des demandes à variabilité importante.

- **La classification de maturité de pièce :**

La manière classique d'avoir une classification de maturité de la pièce est de se baser sur :

Les calculs/ études de cycle de vie lors de la phase de conception de la pièce.

Des données de fiabilité de la pièce et de type de la pièce (mécanique /électrique...) par échantillonnage sur des pièces déjà en utilisation.

Devant l'absence de ses informations, nous nous basons sur les données de demande et la date d'introduction de la référence. Nous étudions l'évolution du profil de la demande en fonction de cette date d'introduction. Pour ce faire, nous nous basons sur une simulation sur un très large nombre de références : environ 8000 références des bases de données de GEHC. L'utilisation d'un large nombre de produits permettra d'analyser la tendance du profil de la demande en fonction du niveau de maturité de la pièce.

Les résultats sont représentés dans les graphes suivants (Figure 19 et 20):

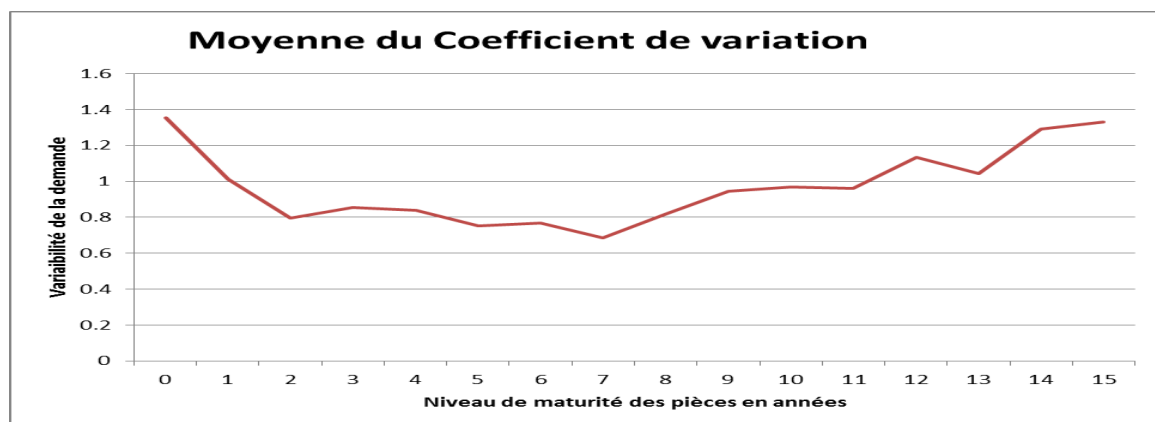
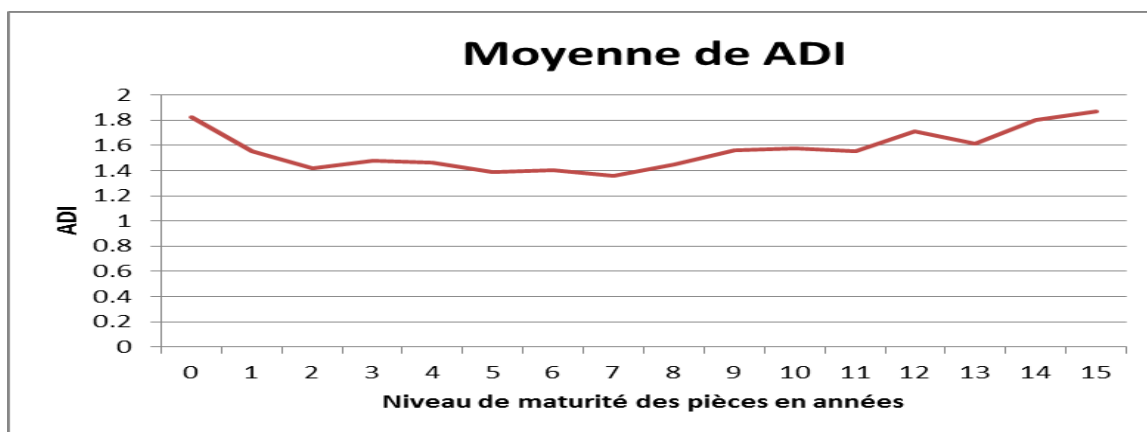


Figure 19: Evolution de la variation de la demande en fonction du niveau de maturité des pièces



**Figure 20: Evolution de l'intervalle moyen de la demande en fonction du niveau de maturité**

Les écarts entre deux points successifs en niveau de maturité de ces deux graphiques sont représentés dans le tableau 14 suivant :

Niveau de maturité	Ecart en variabilité	Ecart en ADI
0 → 1	-0.34	-0.28
1 → 2	-0.22	-0.13
2 → 3	0.06	0.06
3 → 4	-0.01	-0.01
4 → 5	-0.09	-0.08
5 → 6	0.01	0.02
6 → 7	-0.08	-0.04
7 → 8	0.13	0.09
8 → 9	0.13	0.11
9 → 10	0.02	0.01
10 → 11	-0.01	-0.03
11 → 12	0.17	0.16
12 → 13	-0.09	-0.09
13 → 14	0.25	0.18
14 → 15	0.04	0.07

**Tableau 14: Ecart en variabilité et en ADI selon le niveau de maturité de la pièce**

Les deux graphiques, montre que l'évolution est sous forme de courbe en baignoire à la fois par critère de variabilité de la demande et par critère d'intervalle moyen entre les demandes. Cependant, cette correspondance avec la courbe en baignoire est plus claire par le critère de variabilité de la demande.

L'analyse numérique des écarts de transition (tableau 14) entre les différents niveaux de maturité en années, valide cette analyse graphique et permet d'identifier des points d'inflexion de ces courbes.

**Le passage de 2 ans à 3 ans :** Identifie l'arrêt d'une tendance à la baisse de la variabilité et de l'ADI de la demande qui avait commencé à un niveau très fort lors de la première année. Donc le passage à une période plus stable.

**Le passage de 7ans à 8ans :** Identifie l'arrêt d'une stabilité de l'évolution du niveau de la variabilité et de l'ADI, vers une tendance à la hausse de ces deux mesures statistiques.

On peut donc retrouver les trois niveaux de maturité classique des pièces de rechange, en les identifiant par des seuils.

Ainsi, nous allons retenir les seuils suivant :

- ✓ **Introduction :** Entre 0 à 2 ans.
- ✓ **Maturité :** Entre 3 ans à 7 ans.
- ✓ **Fin de vie :** Supérieure à 8 ans.

## ii. Etape du processing

Par soucis de concision, nous nous limitons à l'utilisation de 4 méthodes de prévision :

- La méthode de la moyenne mobile (**MA**) comme représentative des méthodes avec un principe de moyenne.
- La méthode de lissage simple (**SES**) comme représentative des méthodes avec un principe de lissage.
- Les méthodes Croston (**CR**) et sa variante (**SBA**) comme représentatives des méthodes avec principe de double prévision de quantité et d'intervalle.
- Nous évaluerons dans une partie dédiée (III.c) l'apport des méthodes hybrides proposés (**Hy1**) et (**Hy2**).

## iii. Etape du post-processing

Nous comparons les sélections obtenues selon les mesures suivantes :

- ✓ La mesure **MSE** comme représentative des mesures de sélection statistique.
- ✓ La mesure **LTFE** qui prend en considération le temps d'approvisionnement, avec 4 scénario :  $LT = \{1, 3, 5, 8\}$  mois.
- ✓ La mesure **IOE** qui prend en considération la tendance de surestimation ou sous-estimation de la demande et dans le risque de surstock et de pénurie de stock, avec 2 scénarios :
  - Un  $\lambda = 0.7$  pour privilégier une priorité stock au niveau de service. Ceci peut correspondre à une classification des pièces à coût faible et une criticité élevée.
  - inversement  $\lambda = 0.3$  Une priorité stock peut correspondre à une classification des pièces à coût élevé et d'une criticité faible.

## **b. Résultats de la comparaison de la sélection par classifications**

Nous testons le plan d'expérience ci-dessus sur des données extraites d'une base de données de GE Healthcare. Cette base de données est composée de demandes de 1500 références de pièces de rechange.

Nous représentons les résultats en pourcentage de sélection de chaque méthode par rapport à la classification en profil de la demande, puis par rapport à la classification en niveau de maturité des pièces de rechange.

Aussi, nous représentons les résultats de telle manière à mesurer l'impact du changement du temps d'approvisionnement, ainsi que celui de la priorité stock ou service (tableaux 15 à 30).

### **i. Résultats de sélection par segmentation de profil de la demande**

#### **✓ Impact du temps d'approvisionnement**

##### **• Pièces Stables**

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	68.2	65.6	62	59.4
SES	5.4	6.4	6.8	7.4
CR	8.2	10	10.2	12
SBA	18.2	18	21	21.2
Total	100%	100%	100%	100%

**Tableau 15: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces stables**

##### **• Pièces Sporadique**

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	6.4	33	19	18.4
SES	3.8	9.6	25.4	30.2
CR	26.6	18.8	17.8	15.8
SBA	63.2	38.6	37.8	35.6
Total	100%	100%	100%	100%

**Tableau 16: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces sporadiques**

##### **• Pièces Erratiques**

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	23.6	24	30.6	42
SES	28.6	42.6	51	39.2
CR	23.2	25.8	7.8	8.4
SBA	24.6	7.6	10.6	10.4
Total	100%	100%	100%	100%

**Tableau 17: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces erratiques**

- **Résumé de la performance des méthodes**

Temps d'appro Catégorie de demande	Temps d'approvisionnement court	Temps d'approvisionnement long
Stable	1. MA	1. MA
	2. SBA	2. SBA
Sporadique	1. SBA	1. SBA
	2. CR	2. SES
Erratique	1. SES	1. MA
	2. SBA	2. SES

**Tableau 18: Résumé de la sélection en fonction du temps d'approvisionnement par catégorie de demande**

Les résultats confirment d'abord les résultats de la littérature, concernant l'adaptabilité des variantes de Croston pour les pièces sporadiques, des variantes de la moyenne mobile pour les pièces stables et des variantes de la méthode de lissage pour les pièces à haute variabilité.

Cependant, la principale valeur ajoutée de cette analyse par la mesure LTFE est que si pour les pièces stables la sensibilité à longueur du temps d'approvisionnement est faible, elle est importante pour les pièces sporadiques et erratiques. En effet, la distribution de la sélection change d'une manière significative pour ces deux dernières catégories quand le temps d'approvisionnement augmente.

Ainsi, il sera recommandé d'utiliser l'information sur le temps d'approvisionnement de la pièce de rechange, dans la sélection des méthodes de prévision pour les pièces sporadiques ou erratiques. Pour les pièces stables l'utilisation de cette information dans la mesure n'est pas nécessaire.

- ✓ **Impact par priorité stock/service**

- **Pièces stables**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	68.2	22.8	62.2
SES	5.4	9.4	10.4
CR	8.2	15.6	24.8
SBA	18.2	52.2	2.6
Total	100%	100%	100%

**Tableau 19: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces stables**

- **Pièces Sporadiques**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	6.4	14.4	27
SES	3.8	1.2	5
CR	26.6	14	43
SBA	63.2	70.4	25
Total	100%	100%	100%

**Tableau 20: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces sporadiques**

- **Pièces Erratiques**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	23.6	18.6	51.6
SES	28.6	15	29.8
CR	23.2	4.6	16.2
SBA	24.6	61.8	2.4
Total	100%	100%	100%

**Tableau 21: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces erratiques**

- **Résumé de la performance des méthodes**

Priorité Catégorie de demande	Orientation Stock	Orientation Niveau de service
Stable	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. CR
Sporadique	1. SBA	1. CR
	2. MA	2. MA
Erratique	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. SES

**Tableau 22: Résumé de la sélection en fonction de la priorité stock/service par catégorie de demande**

La remarque principale est que pour toutes les catégories, la méthode la mieux évaluée en priorité stock n'est pas la même en priorité service, ceci justifie le besoin de cette différenciation dans la sélection donc de cette nouvelle mesure.

Par ailleurs, il convient de souligner que la méthode de SBA reste la meilleure pour toutes les catégories quand il s'agit de la priorité stock. Cependant, pour la priorité service la méthode de la moyenne mobile est la meilleure sauf pour la catégorie de la demande sporadique.

## ii. Résultats de sélection par segmentation de maturité de la pièce

### ✓ Impact du temps d'approvisionnement

#### • Pièces en introduction

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	61.8	64.8	64.2	76.2
SES	7.3	8.3	19.7	11.4
CR	14.1	18.7	3.6	2.1
SBA	16.8	8.3	12.4	10.4
Total	100%	100%	100%	100%

Tableau 23: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces en introduction

#### • Pièces en maturité

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	33.3	40.4	36.9	40.0
SES	14.2	19.3	29.2	25.6
CR	21.3	18.9	11.2	13.0
SBA	33.3	21.3	22.7	21.3
Total	100%	100%	100%	100%

Tableau 24: Sélection en fonction du temps d'approvisionnement pour des pièces en maturité

#### • Pièces en fin de vie

LTFE	LT=1	LT=3	LT=5	LT=8
MA	24.8	35.2	30.3	30.2
SES	12.8	22.5	28.7	29.3
CR	20.8	17.4	14.6	14.1
SBA	41.6	25.0	26.4	26.4
Total	100%	100%	100%	100%

Tableau 25: Sélection en fonction d temps d'approvisionnement pour des pièces en fin de vie

#### • Résumé de la performance des méthodes

Temps d'approvisionnement Catégorie de maturité	Temps d'approvisionnement court	Temps d'approvisionnement long
Introduction	1. MA	1. MA
	2. SBA	2. SES
Maturité	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. SES
Fin de vie	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. SES

Tableau 26: Résumé de la sélection en fonction du temps d'approvisionnement par niveau de maturité

La mesure statistique classique (à une période) montre qu'en dehors de la phase d'introduction durant laquelle la méthode de moyenne mobile a été la mieux classée, la méthode SBA a été meilleure pour les autres catégories. Ceci explique le besoin de suffisamment de données pour que les méthodes spécifiques aux pièces de rechange comme SBA deviennent efficaces.

Par ailleurs, quand le temps d'approvisionnement est important, la méthode de moyenne mobile a été la mieux évaluée pour toutes les catégories.

✓ **Impact par priorité stock/service**

• **Pièces en introduction**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	61.8	63.2	67.4
SES	7.3	7.8	5.7
CR	14.1	1.6	12.4
SBA	16.8	27.5	5.2
Total	100%	100%	100%

**Tableau 27: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en introduction**

• **Pièces en maturité**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	33.3	27.8	37.1
SES	14.2	18.9	9.5
CR	21.3	12.2	18.1
SBA	33.3	41.0	12.8
Total	100%	100%	100%

**Tableau 28: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en maturité**

• **Pièces en fin de vie**

	Approche1	Approche 2	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>
MA	24.8	24.0	35.9
SES	12.8	16.6	7.7
CR	20.8	12.8	24.4
SBA	41.6	46.6	12.3
Total	100%	100%	100%

**Tableau 29: Comparaison de la sélection en fonction de 2 approches pour des pièces en fin de vie**



- **Résumé de la performance des méthodes**

Priorité \ Catégorie de maturité	Orientation Stock	Orientation niveau de service
Introduction	1. MA	1. MA
	2. SBA	2. CR
Maturité	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. CR
Fin de vie	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. CR

**Tableau 30: Sélection en fonction des priorités stock/service par catégorie de niveau de maturité des pièces**

La méthode de SBA est mieux évaluée pour la priorité stock et la méthode MA pour la priorité service, sauf pour la phase d'introduction où la méthode SBA qui visiblement a besoin d'un historique important avant de monter en performance.

### c. Résultats de l'évaluation des méthodes hybrides

Pour évaluer la méthode de prévision hybride dans ces deux configurations, nous utilisons le même plan d'expérience de la section précédente. Sauf pour l'étape de post-processing, où on va se limiter à la sélection par la mesure classique MSE (tableaux 31 à 34).

#### i. Evaluation de la méthode Hybride 1

##### ✓ Sélection par segmentation du profil de la demande

Méthode de prévision	Pièces Stables	Pièces sporadiques	Pièces erratiques
MA	60.2	6	21.8
SES	4.2	3.2	24
CR	7.0	20.6	18.6
SBA	14.2	47.4	18.4
HY1	14.4	22.8	17
Total	100%	100%	100%

**Tableau 31: Sélection de la méthode hybride 1 par catégorie de demande**

##### ✓ Sélection par segmentation du niveau de maturité de la pièce

Méthode de prévision	Pièces en introduction	Pièces en maturité	Pièces en fin de vie
MA	59.1%	29.8%	21.2%
SES	7.3%	11.8%	10.4%
CR	11.4%	15.4%	16.5%
SBA	11.9%	24.9%	31.9%
HY1	10.4%	18.1%	19.9%
Total	100%	100%	100%

**Tableau 32: Sélection de la méthode hybride 1 par niveau de maturité des pièces**

La méthode Hybride 1 (**HY1**) n'a jamais été la plus sélectionnée, mais a été souvent en deuxième position.

Cependant, il convient de remarquer que cette méthode est plus performante dans le cas de la demande sporadique quand il s'agit d'une classification en profil de la demande. Aussi, la méthode est mieux évaluée dans le cas des phases de maturité et de fin de vie par rapport à la phase d'introduction.

## ii. Evaluation de la méthode hybride 2

### ✓ Sélection par segmentation du profil de la demande

Méthode de prévision	Pièces Stables	Pièces sporadiques	Pièces erratiques
MA	58.8	5.8	18.2
SES	4.2	2	17.2
CR	6.2	13.8	12.6
SBA	13.4	35.2	11.4
HY2	17.4	43.2	40.6
Total	100%	100%	100%

Tableau 33: Sélection de la méthode hybride 2 par catégorie de demande

### ✓ Sélection par phases de niveau de maturité de la pièce

Méthode de prévision	Pièces en introduction	Pièces en maturité	Pièces en fin de vie
MA	58.5	26.8	19.9
SES	7.3	9.5	6.7
CR	11.4	9.9	11.4
SBA	13.0	19.3	22.3
HY2	9.8	34.5	39.6
Total	100%	100%	100%

Tableau 34: Sélection de la méthode hybride 2 par niveau de maturité des pièces

La méthode Hybride 2 (**HY2**) est beaucoup plus performante que la méthode (**HY1**), ceci peut s'expliquer par sa capacité de prendre en compte la tendance de sélection.

Par ailleurs, la différence de performance de cette méthode en fonction de la classification est beaucoup plus visible dans ce cas, en effet cette méthode est la plus sélectionnée dans le cas de la demande sporadique et erratique. Aussi, si la performance de cette méthode est faible dans la phase d'introduction elle est par contre la mieux classée pendant les phases de maturité et de fin de vie.

## Conclusion

Ce chapitre a apporté des contributions au processus de prévision de la demande en pièces de rechange ayant comme objectif de s'aligner avec les points identifiés dans l'analyse de la problématique de prévision et de gestion des stocks en pièces de rechange du chapitre 3 (I1 à I6).

En effet, ces contributions élargissent la classification des pièces de rechange dans ce contexte, notamment avec la prise en compte du niveau de maturité des pièces (I1). Elles se basent sur des modèles de prévision d'historique de la demande (I2). Elles considèrent l'aspect faible et erratique de la demande dans l'approche de sélection (I3) et proposent de nouvelles mesures de sélection qui permettent une première considération des priorités de la gestion des stocks.

L'analyse de résultats d'un plan d'expérience utilisant ces propositions, a montré la pertinence d'une segmentation par niveau de maturité des pièces de rechange dans le processus de sélection des méthodes de prévision. Cette analyse a justifié aussi le besoin des mesures proposées qui sélectionnent souvent des méthodes différentes en fonction de la longueur du temps d'approvisionnement et en fonction des priorités stock ou service. Finalement, une analyse de la performance des méthodes de prévision hybride proposées par nos travaux a montré une bonne qualité de sa deuxième configuration et que sa performance peut varier en fonction de la classe de la pièce.

Cependant, sachant que l'objectif ultime d'un processus complet de gestion des stocks passant par la prévision étant l'amélioration de ses indicateurs finaux en gestion des stocks, en niveau de service et niveau de stocks (I4), ceci implique un besoin d'intégration avec les politiques de gestion de stocks afin d'évaluer les méthodes de prévision par les indicateurs finaux de gestion de stocks (I5).

## **Chapitre 5 : Processus de gestion de stocks basée sur des prévisions**

### **I. Processus classique de gestion de stocks en pièces de rechange**

- a. Les classifications en gestion des stocks des pièces de rechange
- b. Modèles de gestion des stocks
- c. Indicateurs d'évaluation des modèles de gestion de stocks
- d. Synthèse du processus et proposition d'amélioration

### **II. Impact des classifications des pièces sur les performances en gestion des stocks**

- a. Plan d'expérience
- b. Résultats et analyse

## **Introduction**

Le processus de prévision présenté en chapitre 4 permet la détermination des estimations de la demande pour les prochaines périodes par la méthode de prévision sélectionnée. Ces sorties sont utilisées dans le processus de gestion de stocks qui a comme objectif la détermination des seuils d'approvisionnement, ce chapitre analysera ce deuxième processus.

Comme pour le processus de prévision on peut diviser le processus de gestion de stocks de la littérature en trois étapes :

Etape de pre-processing : qui permet de déterminer les classifications utilisées en gestion des stocks.

Etape de processing : qui présente le modèle de gestion de stocks utilisé.

Etape de post-processing : qui évalue le modèle de gestion de stocks par des indicateurs de service et d'inventaire.

Après une présentation de l'ensemble des critères et méthodes qui ont été utilisés dans chacune de ces trois étapes, ce chapitre soulignera le manque d'évaluation de ce processus par les classifications de profil de demande et de niveau de maturité de pièces de rechange, puis effectue cette analyse sur des données réelles pour différents scénarios de temps d'approvisionnement, qui permettra de reconstruire la logique de définition du niveau de service théorique utilisé dans le modèle de gestion de stocks.

### **I. Processus classique de gestion de stocks en pièces de rechange**

#### **a. Les classifications en gestion des stocks des pièces de rechange**

##### **i. Classification Coût**

La classification de coût est souvent utilisée dans la décision de la gestion des stocks [63]. Cependant le critère de calcul de cette classification diffère selon les cas d'application.

La première référence de cette classification est l'analyse de Pareto, qui a montré une inégalité entre les facteurs des revenus économiques des pays. Ceci a conduit à la construction d'une classification qui permet de déterminer ce qui est considéré comme « le peu de facteurs » qui génèrent « le plus de revenus » [134]. Cette inégalité de distribution a été confirmée dans les pratiques industrielles, la première référence revient à une analyse faite à General Electric qui a montré que ce phénomène est aussi présent dans le cas de la distribution d'inventaire [135].

La classification ABC est la plus utilisée dans ce contexte. Elle divise les produits/ pièces en trois catégories distinctes. La catégorie A dite aussi le « peu significatif », qui rassemble souvent le peu de pièces qui représentent 80% du critère de classification. La catégorie B qui

est une catégorie intermédiaire, qui rassemble souvent un nombre important de pièces qui représentent 15% du critère de classification. La catégorie C dite aussi le « beaucoup trivial », qui rassemble souvent un nombre important de pièces qui représentent seulement 5% du critère de classification.

Ces critères de classification en coût/ inventaire peuvent être :

- L'inventaire existant.
- Le coût unitaire.
- La valeur de la demande sur une période donnée (Souvent sur une année) dite aussi (AUD : pour Annual Used Dollars).

## **ii. Classification criticité**

La notion de la criticité est parmi les classifications les plus utilisées pour les pièces de rechange [107]. En effet, on différencie entre : Les pièces dites « vitales » qui sont indispensables au fonctionnement du système, toute panne cause l'arrêt immédiat de ce système. Les pièces dites « désirables » qui sont des pièces souvent cosmétiques, malgré leurs pannes le système peut continuer à fonctionner.

Une classification a été donc définie dans la littérature, sous l'appellation « VED classification » [107], avec V pour vitale, E pour essentielle et D pour désirable.

Contrairement à la classification quantitative de coût, cette classification est qualitative ; elle se base souvent sur la connaissance d'expert. Cet expert peut être le concepteur ou le fabricant du système, comme ça peut être le technicien de maintenance qui selon son expérience de terrain, peut juger si une pièce est critique pour sa maintenance ou pas.

Certaines références ont proposé des modèles de classification VED avec la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) [136], qui se base sur une hiérarchisation de plusieurs critères : le type de pièce, la longueur du temps d'approvisionnement, les alternatives lors d'une panne.... Chaque critère a un ensemble d'alternatives qui représentent l'ensemble des classes possibles et un poids associé.

D'autres critères de classifications qualitatives ont été utilisés ou combinés avec le critère de criticité [105], comme la spécificité de la pièce qui précise si la pièce est spécifique à un seul système ou partagée entre plusieurs systèmes et la criticité du système, qui définit si le système de la pièce en question est critique pour le fonctionnement du site.

### **iii. Classification de capacité d'approvisionnement**

Cette classification est définie par la capacité du fournisseur d'approvisionner une pièce.

Lorsqu'une nouvelle pièce est installée puis introduite dans les bases de données, une chaîne logistique est affectée à cette pièce et notamment un fournisseur dédié. Or dans la réalité, après un certain temps, si certains fournisseurs arrivent à continuer à satisfaire la demande en leurs pièces, d'autres peuvent avoir des difficultés à maintenir cette fonction et peuvent finir par exprimer leur incapacité d'assurer l'approvisionnement.

En effet, le service de production du fournisseur peut décider de changer de gamme suite à par exemple la faible demande en cette pièce. S'agissant d'un besoin d'approvisionnement qui peut durer des années dans le cas des pièces de rechange, certains fournisseurs peuvent changer avec le temps leur stratégie de fabrication ou complètement disparaître.

Pour ces raisons, une classification a été proposée dans la littérature pour séparer entre les pièces en fonction de la capacité d'approvisionnement [137], appelée SDE. Avec S pour Scarce « Rares » qui sont les pièces qui ont une très grande difficulté d'approvisionnement et pour lesquels il faut chercher des solutions de fournisseurs alternatifs, D pour Difficult « Difficiles » qui sont les pièces difficiles d'approvisionnement, E pour Easy « Faciles » qui n'ont aucune ou peu de difficulté d'approvisionnement.

### **iv. Classifications demande et stockage**

Deux autres classifications ont été proposées dans la littérature pour la gestion des stocks, la première concernant la demande. Dans ce cas, cette classification est souvent en quantité. Elle est appelée HML, avec H pour « Haute » qui représente les pièces qui ont une haute demande, M pour « Moyenne » qui représente les pièces avec une demande est moyenne et L pour « Faible » qui représente les pièces avec une demande est faible. Les seuils entre les classes peuvent être déterminés par une analyse Pareto [137].

Aussi une classification en taux de rotation des stocks est utilisée, ceci peut séparer entre des pièces à haute rotation et d'autres à faible rotation. Appelée la classification FSN, avec F pour Fast qui représente les stocks à une haute rotation, S pour Slow qui représente les stocks à faible rotation et N pour None, qui représente les stocks sans aucune rotation [137].

## **b. Modèles de gestion des stocks**

### **i. Types de Modèles de gestion de stocks**

#### **1) Types de revues**

##### **✓ Revue périodique (R, Q)**

La logique de cette politique est de surveiller l'état du stock par périodicité. Dans le cas d'une revue à périodicité  $T$  ( $T \in \mathbb{N}$ ), si la période actuelle est  $N \times T$  avec  $N \in \mathbb{N}$  le niveau de stock est mesuré, s'il est au-dessous de **R** une commande à quantité économique est placée pour atteindre le niveau **Q** [138].

Cette politique permet une bonne synchronisation des commandes et du suivi, mais son grand inconvénient est l'impossibilité de réaction et l'absence de traçabilité pendant une même période.

##### **✓ Revue Continue (s, S)**

La logique de cette politique est de surveiller l'état du stock d'une manière continue. Dès que le niveau de stock descend au-dessous de **s** une commande est placée pour atteindre le niveau **S** [98].

Cette politique permet plus de réactivité à la variabilité de la demande et la diminution du temps de pénurie de stocks.

#### **2) Types de quantités commandées**

Les politiques de gestion des stocks utilisent deux types de quantités commandées.

##### **✓ Les quantités fixes**

Dans ce cas le modèle place toujours une commande de la même quantité, ceci peut être dû à des contraintes imposées par le fournisseur ou dans le cas d'une demande très stable.

##### **✓ Des quantités variables**

Dans ce cas le modèle place une commande qui peut varier d'une période à une autre, ceci impose une flexibilité du fournisseur. Cette politique est souvent recommandée dans le cas d'une demande variable.

Ainsi, quatre types de politiques de gestion de stocks peuvent être identifiés selon les deux types de revue de stock et de quantité commandée (tableau 35).



Quand Combien	Revue périodique	Revue continue
Quantité fixe	Méthode calendaire	Méthode de point de commande
Quantité variable	Méthode de reapprovisionnement	Réapprovisionnement à la commande

**Tableau 35: Types de méthodes de gestion des stocks**

Dans le cas des pièces de rechange la politique à revue continue et quantité variable « réapprovisionnement à la commande » est la plus recommandée du fait de sa réactivité au caractère variable de la demande et l'aspect critique de la panne qui exige plus de réactivité d'approvisionnement [9].

### **3) Mode de gestion des commandes**

#### **✓ Commandes perdues « Lost Sales : LS »**

Dans ce cas, si une demande n'est pas satisfaite à partir du stock, alors la commande est perdue. Ce schéma est rencontré dans le cas d'un stock de produits finis ou si aucun contrat n'est établi ou si une concurrence qui propose un produit similaire est existante [139].

#### **✓ Commandes en attente « Backorder : BO »**

Dans ce cas si une demande n'est pas satisfaite à partir du stock, alors la demande reste en attente, elle est dite en « backorder ».

Le schéma à Backorders est le plus rencontré dans le cas de la gestion des pièces de rechange d'un équipement [140], à cause de la difficulté de trouver un remplaçant chez le concurrent et car souvent un contrat est établi avec le client.

### **ii. Modèles de gestion des stocks sur des prévisions**

La littérature des modèles se base en majorité sur une hypothèse de demande ou des scénarios de distribution probabiliste de la demande.

En même temps, une littérature spécifique propose des politiques de gestion des stocks sur des prévisions et souligne leurs différences par rapport aux politiques de gestion des stocks sur des demandes [99], [141]. En effet, ces modèles utilisent une estimation de la projection du stocks par des calculs prévisionnels dans la logique d'approvisionnement, intègrent l'erreur prévisionnelle dans le calcul des seuils d'approvisionnement qui sont souvent dynamiques en fonction de la variabilité des prévisions sur les prochaines périodes.

Comme notre travail se base sur un processus de prévision en pièces de rechange, et comme l'objectif est l'intégration entre processus de gestion de stocks et prévision dans le chapitre suivant, on utilisera donc des modèles basées sur les prévisions.

Ainsi, sur la base des notations du tableau 36 nous présentons dans le tableau 37 les calculs de seuils de ces modèles tout en soulignant leur différence par rapport aux calculs basés sur la demande.

Notation	Signification
<b>L</b>	: le temps d'approvisionnement
<b><math>F_{i+k}^{(i)}</math></b>	: Prévision effectuée à la période $i$ pour la période $i + k$
<b><math>f^{-1}(\alpha)</math></b>	: le risque théorique de pénurie de stocks $\alpha$ sur L, avec le niveau de service théorique $SL=1-\alpha$
<b><math>MSE_i</math></b>	: l'erreur de prévision calculée en début de la période $i$
<b>M</b>	: La moyenne de la demande
<b><math>\Sigma</math></b>	: l'écart type de la demande
<b>T</b>	: La période de revue de stock, avec $T=1$ si la revue est continue
<b>H</b>	: La durée souhaitée de couverture par le stock
<b>OC</b>	: les coûts de passation d'une commande
<b>UC</b>	: le coût unitaire de la pièce de rechange
<b>HR</b>	: le taux de possession des stocks

**Tableau 36: Notations pour le tableau 37**

Approche	Modèle Sur demandes	Modèle Sur prévisions
<b>Seuils du modèle</b>		
<b>Stock de sécurité ss</b>	$ss=f^{-1}(\alpha) \times \sqrt{L} \times \sigma$	$ssi= f^{-1}(\alpha) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE_i}$
<b>Point de commande s</b>	$s=ss+ M \times L$	$si= ssi+ \sum_{k=0}^{L-1} F_{i+k}^{(i)}$
<b>Périodicité de revue P</b>	$N \times T$	$N \times T$
<b>Niveau de recomplètement S (ou R selon la notation)</b>	$S= ss + M \times (L + T)$	$Si= ssi + \sum_{k=0}^{L+T-1} F_{i+k}^{(i)}$
<b>Quantité économique Q (Selon Wilson)</b>	$Q=\sqrt{\frac{2 \times OC \times M \times H}{HR \times UC}}$	$Qi=\sqrt{\frac{2 \times OC \times \sum_{k=0}^{H-1} F_{i+k}^{(i)}}{HR \times UC}}$

**Tableau 37: Comparaison entre politiques de gestion des stocks sur prévisions et ceux sur demandes [141]**

Ainsi, les politiques de gestion de stocks sont construites par combinaisons entre les seuils de ce tableau, par exemple :

La politique (**si**, **Si**) représente la politique à revue continue et quantité variable, à chaque moment de la période **i** si le niveau de stock est au-dessous du niveau **si** une commande est placée pour atteindre **Si**.

### c. Indicateurs d'évaluation des modèles de gestion de stocks

#### i. Evaluation du niveau de service

Le niveau de service en gestion de stocks est relatif aux niveaux de pénurie du stock, qui représentent son incapacité de satisfaire une demande client par le stock, pour notre cas il s'agit d'une incapacité de satisfaire une demande du technicien de maintenance.

Ce niveau de service peut être en quantités ou en périodes. Nous considérons le cas de gestion des stocks avec des commandes en attente « backorders ».

Nous présentons les mesures d'évaluation de performance sur **N** périodes avec  $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$  en utilisant les notations du tableau 38:

Notation	Signification
$OH_i$	: le niveau de stock en début de la période <b>i</b>
$D_i$	: la demande à la période <b>i</b>
$BOi$	: le nombre de Backorders générés à la période <b>i</b> par simulation du modèle de gestion de stock

Tableau 38: Notations pour l'évaluation de performance du modèle de gestion de stocks

#### ✓ Les mesures en quantité

Le niveau de service en quantité est :

$$QSL = \frac{\sum_{i=1}^N Di - \sum_{i=1}^N BOi}{\sum_{i=1}^N Di}$$

#### ✓ Les mesures en périodes

Une autre mesure du niveau de service peut être en nombre de périodes qui ont connus des *Backorders*.

**Si**  $BOL_i > 0$  **Alors**  $Pi = 1$ ; **Sinon**  $Pi = 0$

Le niveau de service en périodes est :

$$PSL = \frac{N - \sum_{i=1}^N Pi}{N}$$

## ii. Evaluation du niveau de stock

L'évaluation du niveau de stock se fait en le mesurant en quantité, ou en mesurant la valeur d'inventaire pendant la période de comparaison.

Le niveau d'inventaire (Inventory Level) :

$$IL = \frac{\sum_{i=1}^N OHi}{N}$$

La valeur de l'inventaire (Inventory Value) :

$$IV = UC \times IL$$

Une autre mesure souvent utilisée dans ce contexte est la mesure d'inventaire relatif à la demande (ou rotation d'inventaire), qui représente le rapport entre l'inventaire et la demande, ceci permet d'avoir un référentiel de ce niveau et de comparer donc le niveau d'inventaire entre des pièces de catégories ou de quantité de demandes différentes.

Le niveau d'inventaire relatif (Relatif Inventory Level) :

$$RIL = \frac{\sum_{i=1}^N OHi}{\sum_{i=1}^N Di}$$

## d. Synthèse et proposition d'amélioration

Ainsi nous résumons ce qui a été présenté ci-dessus par un processus de gestion de stocks sur des prévisions en trois étapes (figure 21):

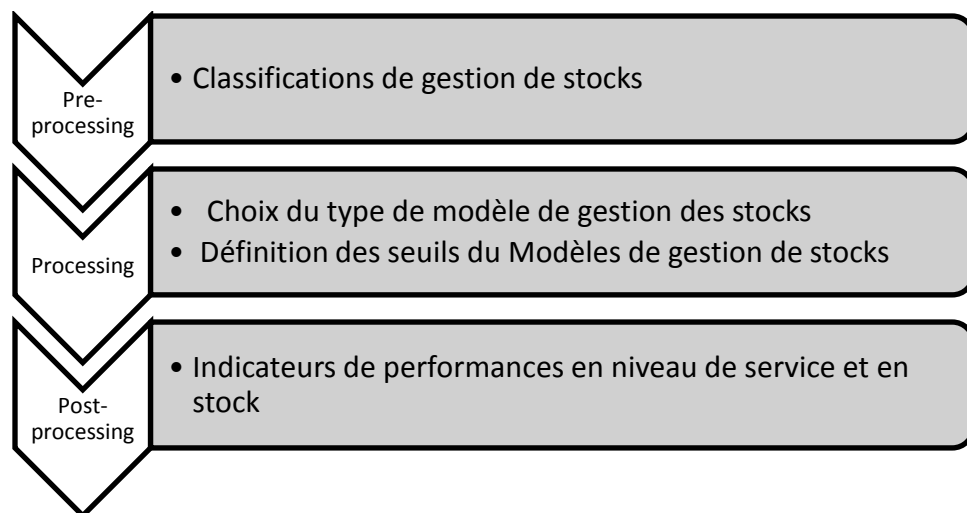


Figure 21: Processus général de gestion des stocks sur des prévisions

Le principal usage de la première étape dans ce processus est la définition du niveau de service à utiliser dans le modèle de gestion de stocks. Souvent, une matrice de niveau de service est définie, en fonction des objectifs des décideurs en service et du budget.

Exemple : cas d'une classification en criticité et coût (tableau 39).

Criticité	Vitale (V)	Essentielle (E)	Désirable (D)
Haut (A)	95%	94%	93%
Moyen (B)	97%	96%	95%
Bas (C)	99%	98%	97%

**Tableau 39: Exemple de matrice de niveau service par classification de gestion des stocks**

Cependant, si on désire atteindre par exemple un niveau de service à 95% pour la catégorie (Vitale (V), Haut (A)), ceci peut être équivalent à l'utilisation d'un niveau de service à 99% pour les pièces sporadiques et 95% pour des pièces stables. En effet, la demande en pièce de rechange étant difficilement prédictible le niveau de service mesuré peut être complètement différent de ce niveau de service théorique défini en avance.

Dans ce sens, bien qu'ils aient un impact sur la qualité des prévisions et par suite sur le niveau de service mesuré, les classifications des pièces de rechange en profil de demande en pièces de rechange et en niveau de maturité des pièces n'ont pas été utilisées pour la définition de ce niveau de service du modèle de gestion de stocks basé sur des prévisions et leur utilisation a été limitée au processus de prévision (sélection de méthode de prévision).

Dans la section suivante, nous utilisons un plan d'expérience sur la base de ces deux classifications : d'abord pour mesurer l'impact de ces classifications sur les indicateurs de gestion de stocks, particulièrement sur la différence entre niveau de service théorique et mesuré. Puis, cette analyse permettra une proposition d'amélioration du processus classique de gestion de stocks afin de mieux définir le niveau de service à utiliser dans le modèle de gestion de stocks dans le cas des pièces de rechange en fonction de ces classifications.

## **II. Impact des classifications des pièces sur les performances en gestion des stocks**

### **a. Plan d'expérience**

Nous reprenons la même base de données utilisée dans le chapitre 4, qui est composée de l'historique de 36 mois de demandes de 1500 références de pièces de rechange. Nous utilisons la classification en profil de la demande en trois catégories : stable, sporadique et erratique et celle du niveau de maturité des pièces en trois catégories : introduction, maturité et fin de vie.

Nous utilisons une seule politique de gestion de stock basée sur des prévisions à revue continue et quantité variable (si, Si), nous rappelons que cette politique étant à revue continue et à quantité variable est la plus adaptée au cas d'une gestion des stocks des pièces de rechange. Aussi, nous considérons un mode de gestion des commandes à *Backorders*.

Les seuils de cette politique de chaque pièce seront calculés sur la base des résultats de prévisions de la méthode la mieux évaluée selon la catégorie de la pièce et en utilisant la mesure qui intègre la valeur du temps d'approvisionnement (LTFE) (voir résultats du chapitre 4 : tableaux 15, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 26).

Nous utilisons deux indicateurs de performances, le premier de service et le deuxième de stock : le niveau de service en quantité **QSL** et le niveau d'inventaire relatif **RIL**.

Nous varions deux paramètres pour évaluer l'impact en service et en stock selon la catégorie de la demande.

- ✓ Le temps d'approvisionnement : Nous considérons 4 scénarios  $LT = \{1, 3, 5, 8\}$ .
- ✓ Le niveau de service théorique : nous considérons un niveau de service variant entre 90% et 99% avec une incrémentation de 1%.

Nous pouvons donc résumer dans la figure 22 ci-dessous notre plan d'expérience en reprenant le processus de gestion de stocks général qu'on a présenté dans la figure 21 ci-dessus:

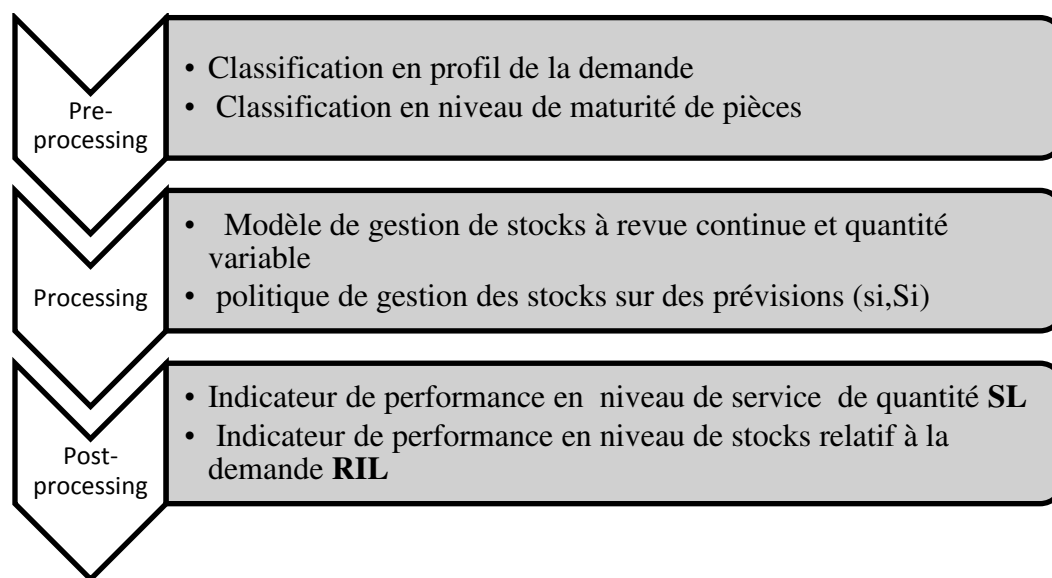


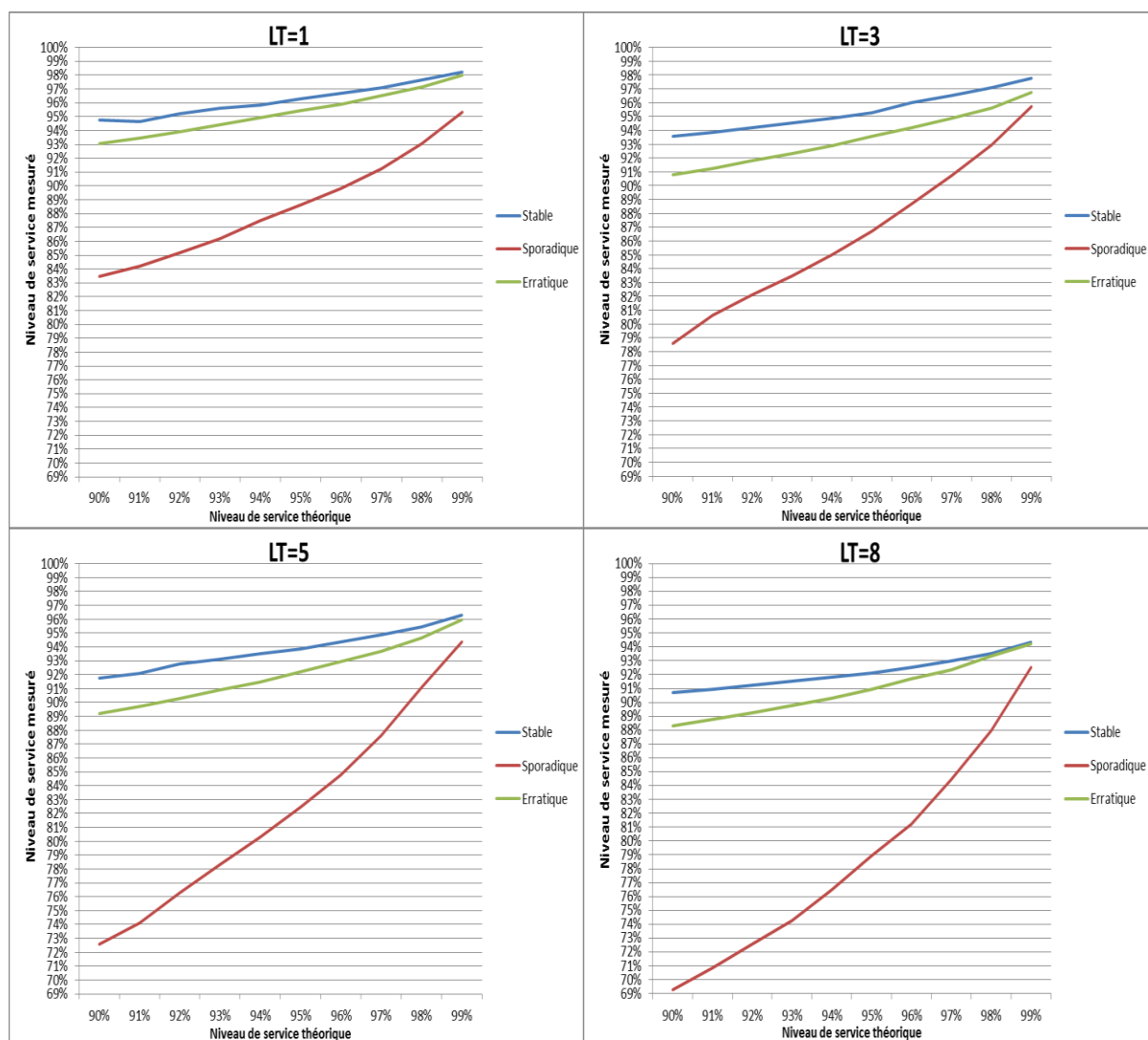
Figure 22: Processus testé de gestion de stocks sur des prévisions

## b. Résultats et analyse

Nous représentons ici les résultats du plan d'expérience décrit ci-dessus par classification de profil de demande puis par classification de niveau de maturité des pièces.

### ✓ Résultats en classification de profil de demande

#### • Résultats en niveau de service mesuré QSL



**Figures 23: Comparaison du niveau de service par catégorie de demande en fonction du temps d'approvisionnement**

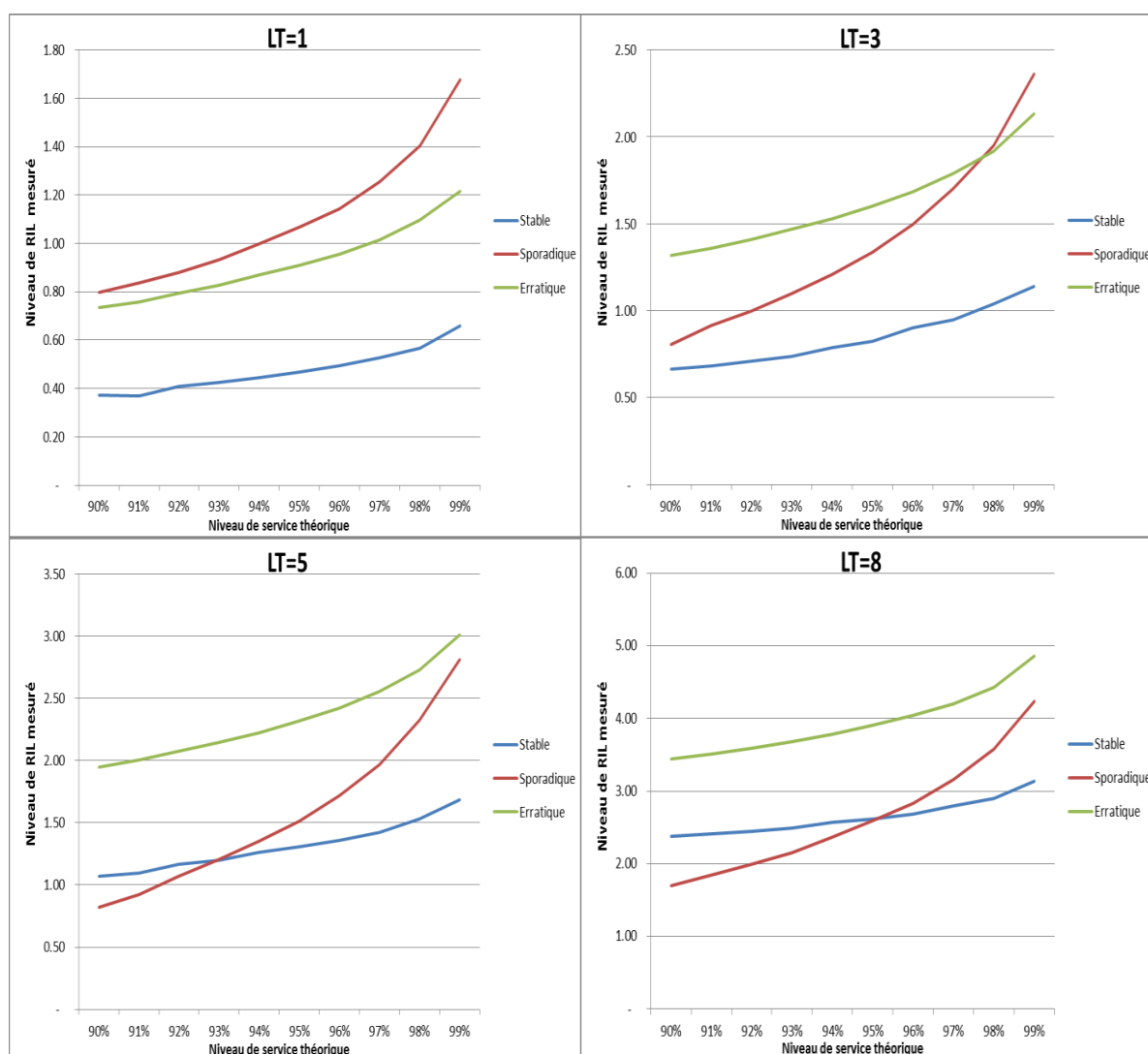
Ces graphiques (figure 23) montrent la différence significative du niveau de service en fonction de la catégorie de la demande quel que soit le temps d'approvisionnement. Cependant, cette différence est plus importante entre la demande sporadique et les deux autres catégories et surtout quand le temps d'approvisionnement est important.

La différence de niveau de service mesuré entre les trois catégories de demande est beaucoup plus importante quand le niveau de service théorique est faible. En effet, comme le niveau de stock est peu sécurisé dans ce cas, il est fortement impacté par les variations de la demande et son effet sporadique. Cependant, à un niveau de service théorique important, la différence en

niveau de service mesuré entre les trois catégories devient très peu visible, dans ce cas comme le niveau de stock est très sécurisé, il peut absorber les effets de variations et d'intermittence de la demande.

Aussi, avec un temps d'approvisionnement court (graphiques 1 et 2) le niveau de service mesuré est plus proche du niveau de service théorique pour les catégories de demande stable et erratique, contrairement au cas d'un temps d'approvisionnement long. Pour la demande sporadique ce niveau se dégrade fortement même dans le cas d'un temps long. En effet, la réactivité au changement de la demande est plus faible quand ce temps devient important.

- **Résultats en niveau d'inventaire relatif RIL**



**Figure 24: Comparaison du niveau de stock par catégorie de demande en fonction du temps d'approvisionnement**

Ces graphiques (figure 24) montrent que la catégorie de demande stable avait souvent le niveau d'inventaire relatif le plus faible (la meilleure performance en stock). Cependant, ceci est plus visible dans le cas d'un temps d'approvisionnement faible. Dans le cas d'un temps



d'approvisionnement long, la catégorie sporadique est plus performante surtout quand le niveau de service utilisé est faible.

La catégorie de demande sporadique est la moins performante quand le temps d'approvisionnement est seulement à 1 mois. Cependant, dès que le temps d'approvisionnement commence à augmenter la catégorie de demande erratique devient la moins performante. Il convient donc à conclure que le niveau de stock a été beaucoup plus impacté par la variabilité de la demande alors que le niveau de service a été beaucoup plus impacté par l'aspect sporadique de la demande.

### ✓ Résultats en classification de niveau de maturité des pièces

#### • Résultats en niveau de service mesuré QSL

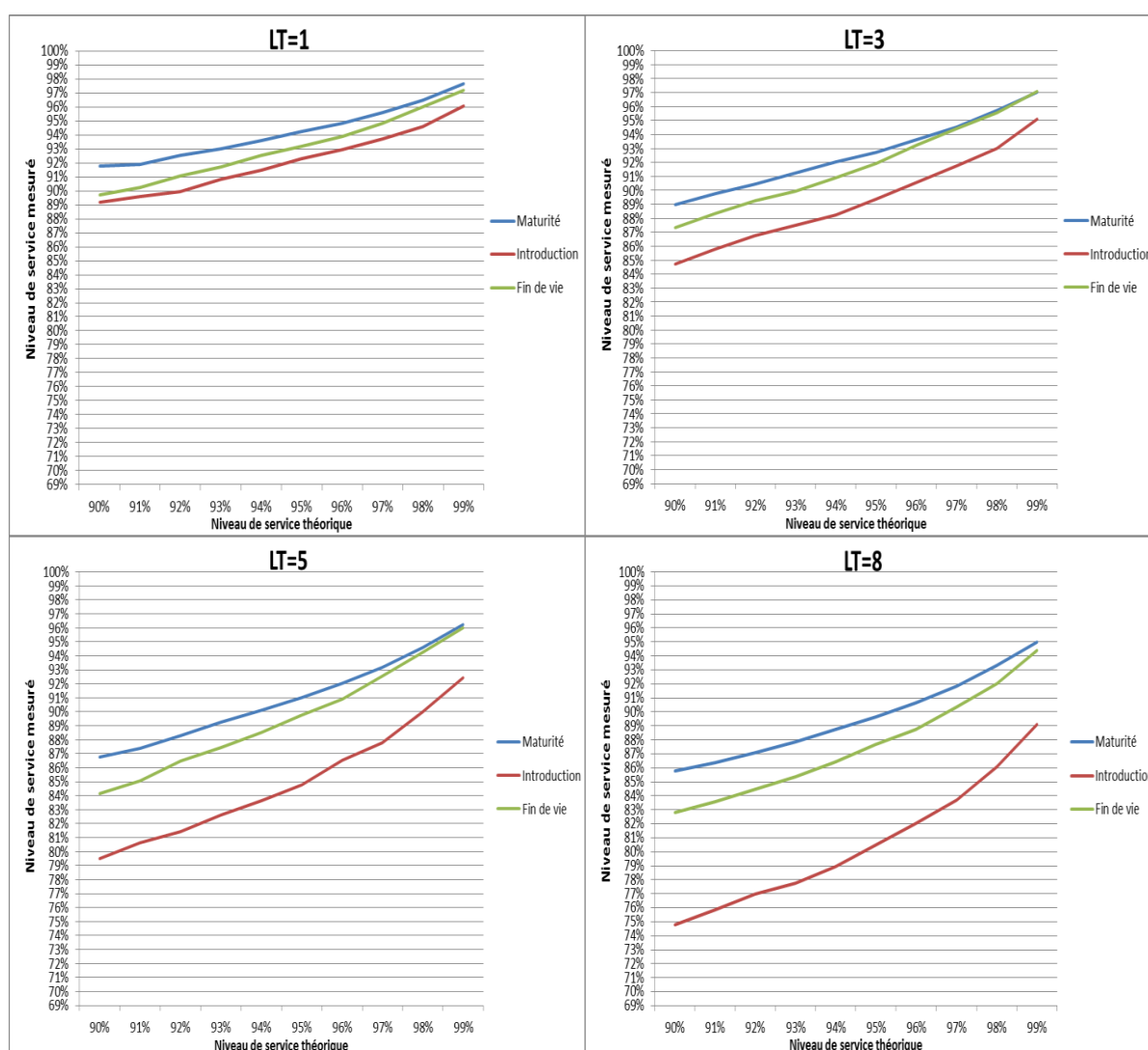


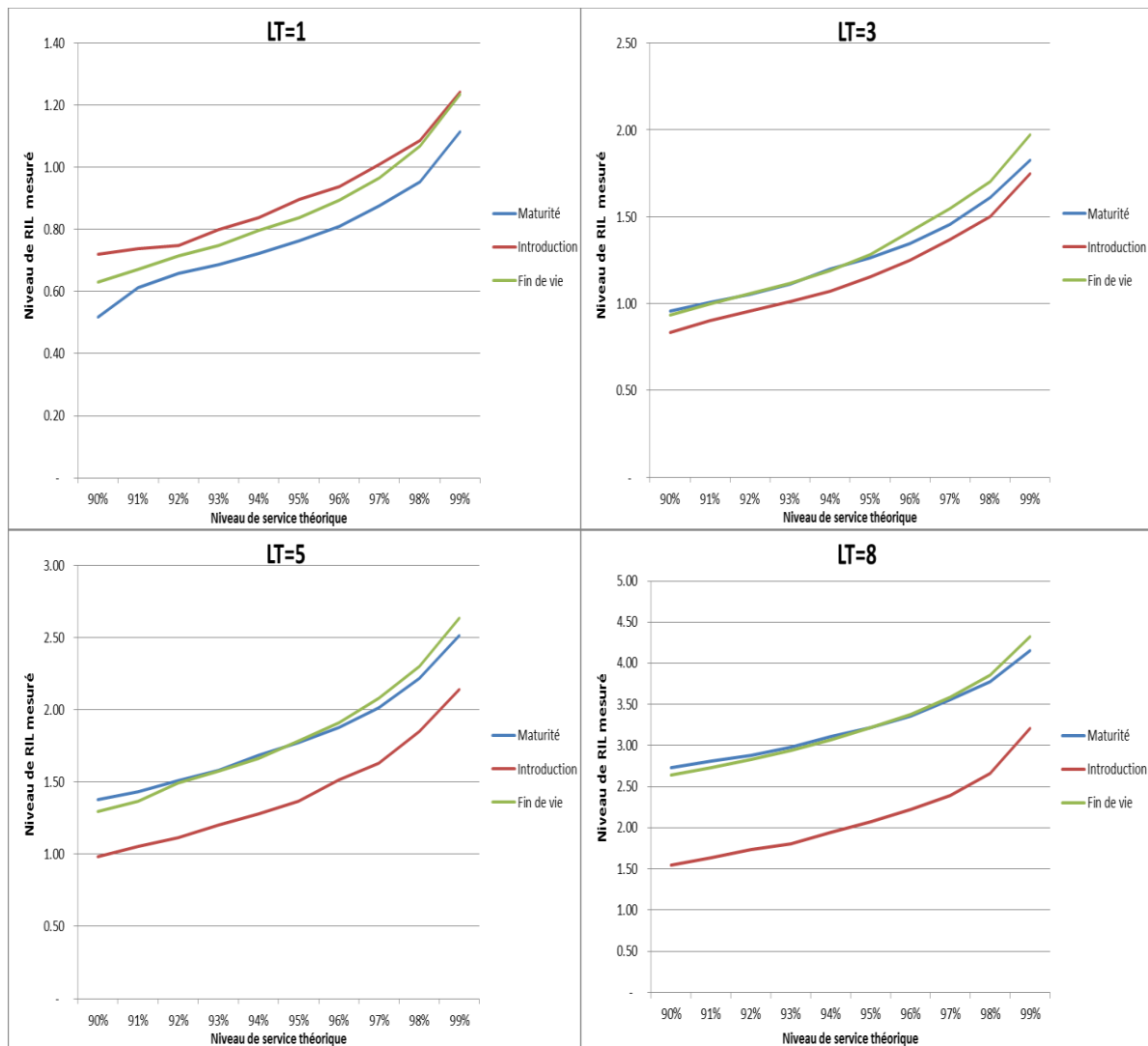
Figure 25: comparaison du niveau de service par niveau maturité de niveau de maturité de pièces en fonction du temps d'approvisionnement

Ces graphiques (figure 25) montrent la différence significative du niveau de service en fonction de la phase vie des pièces de rechange. Cette différence est beaucoup plus importante à un temps d'approvisionnement important. On peut remarquer qu'avec un même niveau de service théorique, les pièces matures ont le meilleur niveau de service mesuré, suivies par les pièces en fin de vie, puis les pièces en introduction. En effet, les pièces matures connaissent moins de risques de *Backorders*, alors que la difficulté d'estimation pour les pièces en introduction et en fin de vie influence la qualité du niveau de service.

Comme pour la classification de profil de la demande, la différence de niveau de service mesurée entre les trois catégories de demande est beaucoup plus importante à un niveau de service théorique faible, dans ce cas comme le niveau de stock est peu sécurisé, il est fortement impacté surtout lors des phases d'introduction et de fin de vie. Cependant, à un niveau de service théorique important, la différence en niveau de service mesuré entre les trois catégories devient très peu visible. Dans ce cas comme le niveau de stock est très sécurisé il peut absorber les effets de changement de demande qui accompagnent les phases de fin de vie et surtout d'introduction.

Aussi, quand le temps d'approvisionnement est court le niveau de service mesuré est plus proche du niveau de service théorique surtout pour les pièces en maturité, cependant le décalage entre le niveau mesuré et le niveau théorique est plus important dans le cas d'un temps d'approvisionnement long et notamment pour les pièces en introduction.

- Résultats en niveau d'inventaire relatif RIL



**Figure 26: comparaison du niveau de stock par niveau de maturité de niveau de maturité de pièces pour différents scénarios de temps d'approvisionnement**

Ces graphiques (figure 26) montrent que la différence entre les trois catégories d'un point de vue inventaire est moins nette que d'un point de vue service.

Néanmoins, on peut remarquer qu'avec un temps d'approvisionnement court les pièces en maturité ont une performance en inventaire significativement supérieure à celle des pièces en introduction et en fin de vie. Ceci n'est plus le cas quand le temps d'approvisionnement devient plus important, ou les pièces en introduction ont une meilleure performance comparant aux pièces en maturité ou en fin de vie.

Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'à temps d'approvisionnement court la rotation du stock est plus importante pour les pièces en maturité, alors qu'avec un temps d'approvisionnement long les pièces en introduction qui passent par des périodes sans demandes, ne font pas appel à une couverture importante en stocks.

L'incrémentation du niveau de service théorique fait augmenter le niveau d'inventaire relatif à la demande. Cependant, contrairement à la performance en niveau de service, ici la différence entre les trois phases de vie reste plus au moins la même quand ce niveau augmente.

Au-delà de ces conclusions de l'impact du temps d'approvisionnement et du niveau de service théorique sur les performances en niveau de service et en inventaire mesurées, en fonction des classifications du profil de la demande et de niveau de maturité des pièces. Ces graphiques peuvent permettre aussi une aide à la décision pour la définition des niveaux de services à utiliser dans le modèle de gestion de stocks en fonction de la classification tout en connaissant l'impact qu'aura cette décision sur le niveau d'inventaire.

Par exemple, pour atteindre le même niveau de service pour toutes les pièces, le décideur devra utiliser un niveau de service théorique plus important pour les pièces à demande erratique par rapports à des pièces à demande stable. Ainsi, on peut faire évoluer le processus de définition de niveau de service pour le modèle de gestion de stocks vers la proposition suivante :

Pour chaque référence :

- 1- Définition de la classification de gestion des stocks : exemple la référence est vitale (V) et couteuse (A),
- 2- Attribution d'un niveau de service théorique : La Matrice de niveau de service (tableau 39) permet de définir le niveau de service souhaité : 95%,
- 3- Définition de la classification en profil de demande ou en niveau de maturité des pièces : exemple la pièce est erratique,
- 4- Sélection du niveau de service associé selon le temps d'approvisionnement de la pièce en utilisant les graphiques : exemple la référence a un temps d'approvisionnement de 3mois (figure 27) :

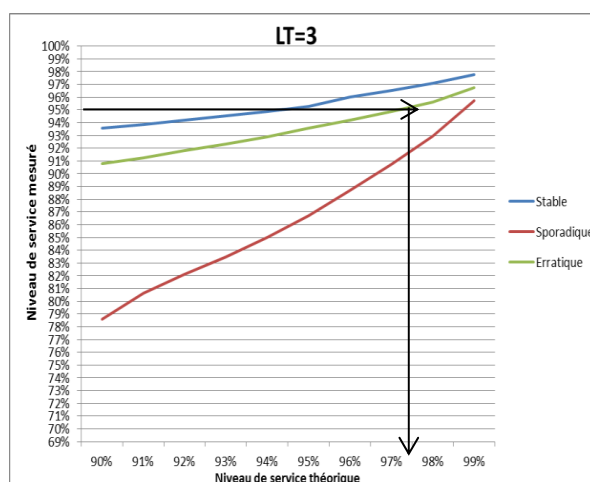


Figure 27: Exemple de définition de niveau de service théorique

- On utilise donc un niveau de service théorique à ~97% pour réellement atteindre le niveau de service souhaité pour cette catégorie de 95%,
- 5- Utilisation du modèle de gestion de stocks pour la détermination des seuils d'approvisionnement pour les prochaines périodes,
  - 6- Evaluation continue de performances en niveau de service et en stocks.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes étapes du processus de gestion de stocks sur des prévisions, il a détaillé donc dans une première étape, les différentes classifications, dans la deuxième les politiques de gestion de stocks basées sur des prévisions et pour finir les indicateurs de performances en gestion de stocks sur la base de la comparaison entre les demandes réelles et les prévisions.

Les classifications du profil de la demande et de niveau de maturité de pièces n'ont souvent été utilisées que dans le processus de prévision en pièces de rechange et non pas dans le processus de gestion de stock en pièces de rechange. Or, les résultats de ce chapitre ont montré l'impact de ces deux classifications sur les indicateurs de gestion de stocks, il convient donc de l'intégrer dans la logique de classification, afin de déterminer le niveau de service. Les résultats de ces expérimentations ont aussi montré la différence de l'impact du temps d'approvisionnement ainsi que le décalage entre le niveau de service mesuré et théorique (I4). Même si le processus utilisé dans ce chapitre se base sur les résultats des prévisions, il ne remet cependant pas en question, la sélection des méthodes de prévision. En effet, dans sa configuration actuelle, cette sélection est plutôt basée sur des critères statistiques et non pas sur les indicateurs de performance en service et en stock, le chapitre suivant visera à combler cette carence (I5).

## **Chapitre 6 : Processus intégré de sélection des méthodes de prévision sur des critères de gestion de stocks**

- I. Approche intégrée de sélection des méthodes de prévision**
  - a. Positionnement de l'intégration entre prévision et gestion de stocks
  - b. Proposition d'une approche de sélection des méthodes de prévision sur des critères de gestion de stocks (approche 3)
- II. Proposition d'une approche de sélection des méthodes de prévision par une analyse multicritères (approche 4)**
  - a. Formulation en modèle MCDA générique
  - b. Utilisation d'une méthode MCDA : Electre III
- III. Comparaison entre les différentes approches de sélection des méthodes de prévision**
  - a. Comparaison avec les approches statistiques
  - b. Comparaison avec les approches d'interaction de la littérature
- IV. Plan d'expérience et résultats**
  - a. Plan d'expérience
  - b. Résultats et analyse

## **Introduction**

La prévision de la demande en pièces de rechange fait appel à des méthodes adaptées à une demande faible et erratique, sa littérature utilise les mesures statistiques classiques de sélection des méthodes de prévision. On a conclu du chapitre 4 que cette sélection change d'une manière importante en fonction de la classification du profil de la demande et du niveau de maturité de la pièce.

Par ailleurs, dans le chapitre 5 nous avons montré que les indicateurs de performance du modèle de gestion de stock sont eux aussi fortement influencés par ces deux classifications, mais la sélection de la méthode de prévision n'a pas été remise en question lors de cette évaluation.

Or, contenu du fait que l'objectif final d'une démarche de prévision et de gestion de stocks est l'amélioration de la performance en service et en stock, une sélection sur la base de ces indicateurs semble donc plus pertinente qu'une sélection purement statistique. Ce chapitre vise à répondre à ce besoin, en proposant des approches et des mesures de sélection intégrant les indicateurs de gestion des stocks et utilisant une méthode d'aide à la décision multicritères, puis compare la nouvelle sélection des méthodes de prévision pour les mêmes classifications utilisées dans les chapitres précédents.

### **I. Approche intégrée de sélection des méthodes de prévision**

#### **a. Positionnement de l'intégration entre prévision et gestion des stocks**

La prévision en pièces de rechange a été définie dans la littérature comme une problématique critique de la gestion des stocks, surtout quand il s'agit du contexte de la chaîne logistique des pièces de rechange [50]. Ainsi, les travaux développés avaient comme objectifs l'amélioration des modèles de prévision qui permettaient une meilleure qualité des estimations en diminuant l'erreur prévisionnelle [81].

De leurs côté, les modèles de gestion de stocks basées sur des prévisions utilisent les sorties de la méthode de prévision précédemment sélectionnée dans le calcul des seuils des politiques de gestion des stocks, principalement les projections prévisionnelles et les erreurs prévisionnelles [141].

Par ailleurs, l'effet de l'erreur prévisionnelle sur l'augmentation des niveaux des stocks de sécurité a été souvent souligné et mesuré [142] et différentes méthodes de prévisions ont été utilisés comme entrées des modèles de gestion de stocks [143]. Cependant, ces références qui lient prévisions et modèle de gestion de stocks considèrent le modèle de prévision utilisé

comme déjà choisi, ou comme hypothèse de départ et ne remettent pas en cause sa sélection dans le processus de gestion de stocks.

Dans le chapitre 4 on a présenté l'approche de sélection statistique classique de la littérature de prévision (approche 1), puis on a proposé de nouvelles mesures statistiques qui permettent de prendre en compte les risques sur l'inventaire ou le niveau de service, ainsi que l'information du temps d'approvisionnement (approche 2), mais jusqu'à ce niveau aucune intégration avec les modèles de gestion de stocks n'a été utilisée.

Cependant, on peut distinguer deux références [144] et [145] qui font une évaluation de l'interaction entre méthodes de prévision et modèles de gestion de stocks en coût et en service. La référence [144] intègre en plus les coûts logistiques et la contrainte de remplissage des camions dans les modèles de gestion des stocks.

Par ailleurs la référence [145] utilise deux méthodes de prévision dont une variante de Croston ainsi que la méthode de lissage simple, car l'objectif de l'article est l'évaluation de cette variante en particulier et non pas la présentation d'une nouvelle approche de sélection des méthodes de prévision. La référence [144] utilise deux méthodes de prévision : la méthode de moyenne mobile et la méthode de valeur maximale qui utilise comme prévision la demande maximale sur un ensemble de périodes, cet ensemble limité de méthodes utilisées est dû au fait qu'il s'agit d'une évaluation de l'interaction dans un contexte de chaîne logistique de produits et non pas de pièces de rechange.

Mais ces références d'interaction ne proposent pas des approches de sélection et par suite des mesures de sélection qui combinent ces critères de gestion de stocks, de plus ces références ne permettent pas une intervention en amont du décideur pour exprimer les priorités en fonction de la classification de la pièce. Aussi, ces références ne combinent pas ces critères par une méthodologie d'aide à la décision multicritères, souvent préconisée dans telles situations décisionnelles.

Afin de répondre à ces limites, ce chapitre proposera deux approches de sélection intégrée avec la gestion des stocks. Avant de conclure de leurs apports par rapport à ces deux articles d'interaction entre prévision et gestion des stocks (partie III.b).



### b. Proposition d'une approche de sélection des méthodes de prévision sur des critères de gestion de stocks (Approche 3)

Outre la combinaison entre méthodes de prévisions et modèles de gestion des stocks proposée dans la littérature, nous proposons, dans ce travail, une nouvelle approche de sélection des méthodes de prévision sur la base des priorités données par les décideurs en fonction de la classification de la pièce. Ceci construit de nouvelles mesures de comparaison adaptées à ces approches permettant une sélection automatique de « la meilleure méthode de prévision ».

L'idée sous-jacente à cette intégration est l'utilisation directe des indicateurs de la gestion de stock pour sélectionner « la meilleure méthode » de prévision sur la base de la classification de la pièce. Cette intégration est donnée par la figure suivante.

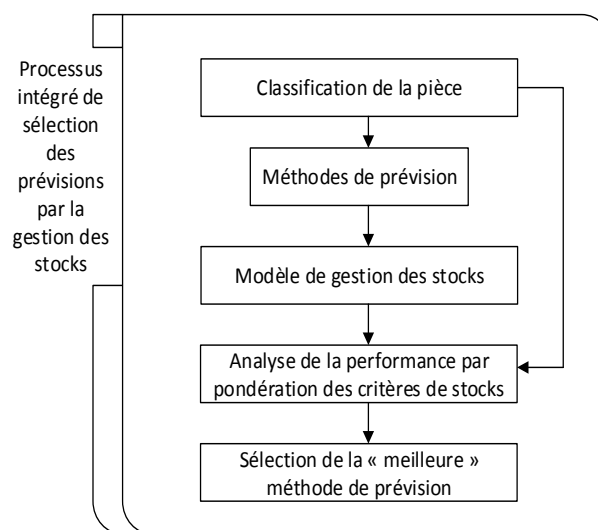


Figure 28: Approche d'évaluation intégrée

Dans cette approche, nous proposons de tester toutes les méthodes de prévision et de simuler sur l'historique leur impact en termes de gestion des stocks en les confrontant à la demande réelle. Cet impact sera mesuré directement grâce aux indicateurs utilisés par la gestion des stocks et la méthode de prévision ayant la performance la plus élevée sera donc sélectionnée.

Pour pouvoir comparer cette méthodologie à celles présentées précédemment, nous allons utiliser une mesure construite à partir des deux plus classiques de la gestion des stocks.

Nous désignons par :

$NB$  : L'ensemble des méthodes de prévision testées.

$OH_i^{(j)}$  : Le niveau de stock à la période  $i$  en utilisant la méthode de prévision  $j$ .

$BO_i^{(j,k)}$  : Le niveau de backorders à la période  $i$  en utilisant la méthode de prévision  $j$ .

Nous définissons la Mesure de l'Inventaire Relative de la méthode de prévision j ( $MIR^{(j)}$ ) de la façon suivante :

$$MIR^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^N OH_i^{(j)} - \min_{k \in NB} \left( \sum_{i=1}^N OH_i^{(k)} \right)}{\min_{k \in NB} \left( \sum_{i=1}^N OH_i^{(k)} \right)}$$

Et la Mesure des backorders Relative de la prévision j ( $MBOR^{(j)}$ ) :

$$MBOR^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^N BO_i^{(j)} - \min_{k \in NB} \left( \sum_{i=1}^N BO_i^{(k)} \right)}{\min_{k \in NB} \left( \sum_{i=1}^N BO_i^{(k)} \right)}$$

Ces deux composantes permettent de mesurer respectivement les niveaux de stocks et de backorders générés par l'utilisation de la prévision j sur tout l'horizon considéré.

Nous définissons alors notre indicateur appelé *Relative Inventory Performance Metric* pour la prévision j ( $RIPM_{\lambda}^{(j)}$ ), comme combinaison convexe de ces deux métriques:

$$RIPM_{\lambda}^{(j)} = \lambda \cdot MIR^{(j)} + (1 - \lambda) \cdot MBOR^{(j)}$$

La valeur de  $\lambda$  traduira les orientations voulues par les décideurs, ou selon la classification de la pièce.

## II. Proposition d'une approche de sélection des méthodes de prévision par une analyse multicritères

### a. Formulation en modèle MCDA générique

Contrairement à la logique de sélection classique, qui repose sur une seule mesure (critère) statistique, on fait appel dans cette nouvelle approche à différents critères, qui sont souvent contradictoires. L'amélioration d'un critère (service) peut engendrer la dégradation de l'autre (inventaire). On est donc dans le cas d'une analyse de performance multicritères.

En outre, l'importance d'un critère par rapport à un autre diffère en fonction de la catégorie de la pièce et le choix des experts en termes de caractéristiques et objectifs pour chaque catégorie.

Il en résulte que la problématique de sélection des méthodes de prévision peut être formulée en un modèle MCDA « Multi Criteria Decision Analysis » [146] (tableau 40).

Notation	Signification
$FM_j$	: l'ensemble des alternatives qui est l'ensemble des méthodes de prévision d'un nombre T avec $FM_j \in \llbracket FM_j, FM_T \rrbracket$
$CR_k$	: le nombre de critères d'évaluation et de sélection de la méthode de prévision d'un nombre M avec $k \in \llbracket 1, M \rrbracket$
$V_{jk}$	: la valeur de l'alternative j par le critère k
$G_j$	: la fonction d'évaluation de l'alternative j

**Tableau 40: Notations communes pour les méthodes MCDA**

La modélisation de la fonction G peut être selon différentes méthodes MCDA [147].

Exemple : dans le cas d'une modélisation en une fonction de somme pondérée la fonction  $G_j$  s'écrit :

$$G_j = \sum_{k=1}^M \lambda_k \cdot V_{jk} \quad \text{Avec } \sum_{k=1}^M \lambda_k = 1$$

Finalement, cette problématique MCDA de sélection de méthode de prévision peut être considérée de type « problématique de choix » souvent notée  $P_\alpha$  [148]. Car l'objectif est le choix (sélection) de la meilleure alternative (meilleure méthode de prévision) selon des critères prédéfinis (ensemble de critères).

## **b. Utilisation d'une méthode MCDA : Electre III**

### **i. Présentation de la Méthode Electre III**

Les méthodes MCDA se basent sur les préférences et les pratiques des décideurs. Ainsi, il n'existe pas une « méthode meilleure » que les autres, il s'agit plus de l'adaptabilité de la méthodologie à la problématique traitée. *“Il y a des différences évidentes entre les méthodes, mais il est difficile de dire si une méthode est plus forte qu'une autre.”* [149]. En effet, le choix de la méthode dépend du type de la problématique, des objectifs et des pratiques des décideurs, de sa capacité de proposer un choix clair entre les alternatives.

A notre connaissance, il s'agit de la première proposition d'application d'une procédure MCDA à cette problématique de sélection de méthodes de prévisions. Nous cherchons donc à utiliser une méthode MCDA qui répond au besoin de cette problématique et non pas une comparaison entre plusieurs méthodes MCDA appliquées à cette problématique.

La méthode Electre III une des méthodes MCDA [150], représente un ensemble de caractéristiques intéressantes pour notre cas. Tout d'abord, cette méthode répond au type de la

problématique MCDA : une problématique de choix. Puis, elle permet de donner un poids en fonction de la connaissance d'expert ou les priorités selon la catégorie de la pièce. Finalement, elle permet d'utiliser des seuils, cette fonctionnalité permettra : de prendre en compte les objectifs d'amélioration que fixent les décideurs, de négliger l'impact d'une différence très minime entre deux choix sur la sélection finale et de complètement rejeter la sélection d'un choix s'il dépasse une limite intolérable selon un critère.

Les entrées de cette méthode sont : les principales entrées d'un modèle MCDA générique, décrites dans la formulation ci-dessus, avec en plus trois seuils, suivants :

- ✓ Le seuil de préférence  $p_k$  représente le seuil au-dessus duquel l'alternative est clairement préférée par le décideur selon le critère k.
- ✓ Le seuil d'indifférence  $q_k$  représente le seuil au-dessous duquel le décideur exprime une indifférence par rapport à la valeur de l'alternative selon le critère k.
- ✓ Le seuil véto  $p_k$  au-dessous duquel l'alternative est rejetée selon le critère k.

Sur la base de ces éléments la méthode d'Electre III calcule des indices de concordance et de discordance :

Supposons deux alternatives a et b : « La concordance indique s'il y a suffisamment d'arguments pour admettre l'hypothèse que  $aSb$  (a surclasse b). Elle est dénotée par  $C_k(a, b)$ . La discordance indique s'il y a une raison suffisante pour refuser cette hypothèse. Elle est dénotée par  $D_k(a, b)$  » [151].

Finalement, un indice de sur classement  $S(a, b)$  est calculé sur la base de ces deux indices de concordance et de discordance, ce qui permet de réaliser un classement final entre les différentes alternatives.

## ii. Algorithme de la méthode Electre III

Pour chaque deux alternatives a et b  $\in FM_j$ .

Et pour chaque critère k l'indice de concordance est calculé comme suit :

$$C_k(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{ak} - q_k \leq V_{bk} \\ 0 & \text{si } V_{ak} - p_k \geq V_{bk} \\ \frac{p_k - V_{ak} + V_{bk}}{p_k - q_k} & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour chaque critère k l'indice de discordance est calculé comme suit :

$$D_k(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } V_{ak} - p_k \leq V_{bk} \\ 1 & \text{si } V_{ak} - v_k \geq V_{bk} \\ \frac{V_{ak} - V_{bk} - p_k}{v_k - p_k} & \text{sinon} \end{cases}$$

Ainsi, l'indice de concordance final entre deux alternatives a et b est déduit par somme pondérée des indices de concordances par critères, selon le poids de chaque critère :

$$C(a, b) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \cdot C_k(a, b)$$

L'indice de sur classement  $S(a, b)$  est déduit de l'indice de concordance final et l'indice de discordance par critère comme suit :

$$S(a, b) = \begin{cases} C(a, b) & \text{si } D_k(a, b) \leq C(a, b) \quad \forall k \in \{1, \dots, M\} \\ C(a, b) * \prod_{k \in H} \frac{1 - D_k(a, b)}{1 - C(a, b)} & \end{cases}$$

Avec H est l'ensemble des critères tel que  $D_k(a, b) > C(a, b)$

### iii. Application à la problématique de sélection de méthode de prévision

On rappelle que l'ensemble des méthodes de prévision FMj représente l'ensemble des alternatives (pour notre exemple ci-dessous on utilise 4 méthodes de prévision T=4).

On considère trois critères d'évaluation des méthodes de prévision  $CR_k$  (M=3) avec:

$CR_1$ = le critère niveau de service,  $CR_2$ = le critère stock,  $CR_3$ =le critère statistique.

On évalue chaque critère par des mesures classiques et faciles à interpréter par les décideurs :  $CR_1$  en Nombre de Backorders **BOs**,  $CR_2$  en niveau d'inventaire moyen **IL**,  $CR_3$  en **MSE** erreur prévisionnelle moyenne, l'objectif est donc d'avoir une sélection combinant les deux critères de gestion de stocks (service et inventaire) ainsi que le critère statistique.

En fonction des catégories des pièces les décideurs donnent des poids, ainsi que des seuils d'indifférence, de préférence et de veto, aux différents critères.

Par la suite les indices de concordance et de discordance sont calculés pour chaque couple de méthode de prévision, ce qui permet de construire une matrice de concordance finale, puis de calculer un indice de sur classement de chaque méthode de prévision.

Nous représentons ici (tableaux 41 à 45) un exemple illustratif d'application aux résultats d'évaluation d'une référence en pièce de rechange de notre cas d'application industrielle.

✓ **Tableau d'évaluation**

Méthodes	$CR_1=Bos$	$CR_2=IL$	$CR_3=MSE$
Moyenne mobile	10	2	9
Lissage simple	30	5	18
Croston	15	4	36
SBA	4	3	9
Paramètres			
Poids w	0.5	0.3	0.2
Seuil de préférence p	5	1	5
Seuil d'indifférence q	10	2	10
Seuil de veto v	20	3	15

**Tableau 41:Exemple d'un tableau d'évaluation avec la méthode Electre III**

✓ **Matrices de concordances**

<b><math>CR_1</math>: Backorders</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0	1	1
SES	1	1	1	1
CR	1	0	1	1
SBA	0.8	0	0	1
<b><math>CR_2</math>: Inventaire</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0	0	1
SES	1	1	1	1
CR	1	1	1	1
SBA	1	0	1	1
<b><math>CR_3</math>: Erreur prévisionnelle</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0.2	0	1
SES	1	1	0	1
CR	1	1	1	1
SBA	1	0.2	0	1

**Tableau 42: Matrices de concordances de la Méthode Electre III**

✓ **Matrices de discordance**

<b><math>CR_1</math>: Backorders</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0	1	1
SES	1	1	1	1
CR	1	0.5	1	1
SBA	1	0	0.1	1
<b><math>CR_2</math>: Inventaire</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0	1	1
SES	1	1	1	1
CR	1	1	1	1
SBA	1	1	1	1
<b><math>CR_3</math>: Erreur prévisionnelle</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	1	0	1
SES	1	1	0	1
CR	1	1	1	1
SBA	1	1	0	1

**Tableau 43: Matrices de discordances de la Méthode Electre III**

✓ **Matrice de concordance finale**

<b>Critères Combinés</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0.04	0.5	1
SES	1	1	0.8	1
CR	1	0.5	1	1
SBA	0.9	0.04	0.3	1

**Tableau 44: Matrice de concordance finale**

✓ **Matrice de sur classement**

<b>Indice de sur classement</b>	MA	SES	CR	SBA
MA	1	0	0	1
SES	1	1	0	1
CR	1	0	1	1
SBA	0	0	0	1

**Tableau 45: Matrice de sur classement**

La comparaison entre l'indice de surclassement et de concordance final de chaque couple, permet de déterminer les surclassements et les préférences :

**Si**  $S(a, b) > S(b, a)$  alors a surclasse b

**Si**  $S(a, b) < S(b, a)$  alors b surclasse a

**Si**  $S(a, b) = S(b, a)$

**Si**  $C(a, b) > C(b, a)$  alors a est préférée à b

**Si**  $C(a, b) < C(b, a)$  alors b est préférée à a

**Si**  $C(a, b) = C(b, a)$  alors pas de préférence

**Fin Si**

**Fin Si**

Ainsi en appliquant à notre exemple :

MA surclasse SES et CR, car  $S(MA, SES) > S(SES, MA)$  et  $S(MA, CR) > S(CR, MA)$ .

Pas de sur-classement entre SES et CR, car  $S(SES, CR) = S(CR, SES)$ , mais CR est préférée à SES, car  $C(CR, SES) > C(SES, CR)$ .

SBA surclasse MA, SES et CR, car  $S(SBA) > S(MA)$ ,  $S(SBA) > S(SES)$  et  $S(SBA) > S(CR)$ .

Par suite SBA surclasse l'ensemble des autres méthodes, elle est par conséquent la méthode sélectionnée pour cet exemple.



### III. Comparaison entre les approches de sélection des méthodes de prévision

#### a. Comparaison avec les approches statistique

Le tableau 46 suivant résume les avantages, les inconvénients et le contexte d'utilisation de chacune des 4 approches.

	<b>Approche 1</b> (statistique classique)	<b>Approche 2</b> (proposée en chapitre 4)
Avantages	Sélection de la méthode avec la meilleure performance statistique	Prise en compte du risque en gestion des stocks dans la sélection sans avoir besoin d'intégrer un modèle de gestion des stocks
Inconvénients	Pas de prise en compte des critères de gestion de stocks dans la sélection	Sélection seulement par des risques et non pas par des mesures directes en gestion des stocks
Contextes d'utilisation	Besoin seulement de la méthode avec la meilleure précision statistique	Besoin de la méthode avec les meilleures performances en gestion de stocks, mais incapacité d'intégrer un modèle de gestion des stocks à cause des contraintes informatiques
Modèles utilisés	Modèle de prévision seulement	Modèle de prévision seulement
	<b>Approche 3</b> (proposée)	<b>Approche 4</b> (proposée)
Avantages	Sélection de la méthode par des critères de gestion de stocks	Sélection de la méthode par une combinaison entre critères de gestion de stocks et critère statistique. Utilisation d'une méthodologie de sélection multicritère. Utilisation de seuils de préférence, d'indifférence et de veto
Inconvénients	Pas de sélection explicite par des critères statistiques. Mais l'erreur statistique est considérée dans le stock de sécurité	Plus difficile que les autres approches. Besoin de plus d'engagement des décideurs
Contextes d'utilisation	Besoin de la méthode de prévision avec les meilleures performances en gestion de stocks	Besoin de la méthode de prévision avec la meilleure performance selon l'importance et les seuils de plusieurs critères
Modèles utilisés	Intégration modèle de prévision avec modèle de gestion des stocks	Intégration modèle de prévision avec modèle de gestion des stocks

**Tableau 46: Comparaison entre les 4 approches de sélection des méthodes de prévision**

## b. Comparaison avec les approches d'interaction de la littérature

Le tableau 47 ci-dessous résume une analyse comparative des points de rapprochements ainsi que les apports des 2 nouvelles approches d'intégration (3 et 4) par rapport aux deux articles de la littérature traitant l'interaction prévision/gestion des stocks.

Sujet traité dans l'article ?	Article [6]	Article [7]	Approche3 (proposée)	Approche 4 (proposée)
Utilisation prévision	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de gestion de stocks	Oui	Oui	Oui	Oui
Intégration prévision/modèle de stock	Oui	Oui	Oui	Oui
Proposition d'évaluation par coût et niveau de service	Service seulement	Oui	Oui	Oui
Intégration coûts logistiques	Non	Oui	Non	Non
Type de modèle	Evaluation	Evaluation	Sélection	Sélection
Proposition de nouvelles mesures	Non	Non	Oui	Oui
Intervention Décideur	Aval et répétitif	Aval et répétitif	Amont et par classe	Amont et par classe
Sélection par des classifications	Non	Non	Oui	Oui
Méthodes utilisées	CR/SES	MA/Maximum	SBA/CR/SES/MA	SBA/CR/SES/MA
Combinaison indicateur statistique et de gestion des stocks	Non	Non	Non	Oui
Utilisation d'une méthodologie d'analyse multicritères	Non	Non	Non	Oui

**Tableau 47: Comparaison des approches proposées avec les approches d'interaction de la littérature**

## IV. Plan d'expérience et résultats

### a. Plan d'expérience

Nous reprenons la même base de données utilisée dans le chapitre 4 et le chapitre 5, qui est composée de l'historique de 36 mois de demandes de 1500 références de pièces de rechange. Nous utilisons la classification en profil de la demande en trois catégories : stable, sporadique et erratique et celle du niveau de maturité des pièces en trois catégories : introduction, maturité et fin de vie.

Nous utilisons la politique de gestion de stock basée sur des prévisions utilisée dans le chapitre 5 (si,Si), nous rappelons que cette politique est à revue continue et à quantité variable. Aussi, nous considérons un mode de gestion des commandes à backorders, le mode le plus rencontré dans le cas de gestion des pièces de rechange.

Nous considérons, un temps d'approvisionnement fixe à 3mois et un niveau de service à 95%. Nous considérons 2 scénarios, le premier à priorité service et le deuxième à priorité stocks, en utilisant les poids suivant (tableau 48):

Critère	Stock	Service	Statistique (erreur prévisionnelle)
Approche			
Approche 3 Scenari 1 : Priorité inventaire <b>RIPM<sub>0.7</sub></b>	0.7	0.3	---
Approche 3 Scenari 2 : Priorité stock <b>RIPM<sub>0.3</sub></b>	0.3	0.7	---
Approche 4 Scenari 1 : Priorité inventaire ( <b>SP</b> )	0.6	0.2	0.2
Approche 4 Scenari 2 : Priorité service ( <b>IP</b> )	0.2	0.6	0.2

**Tableau 48: Le poids utilisés pour les scénarios des tests**

Pour l'approche 4, les trois niveaux de seuils d'indifférence de préférence et de veto, ont été définis par études de percentiles sur les résultats d'un échantillon de 100 pièces de chaque catégorie.

Avec  $q=P10$  ;  $p=P50$  ;  $v=P90$ . ( $P10$  est le percentile à 10%,  $P50$  le percentile à 50% et  $P90$  le percentile à 90%).

Finalement, les résultats de sélection de chaque approche ont été comparés pour chaque catégorie de pièces de rechange, selon la priorité service ou stock.

## b. Résultats et analyse

Nous représentons ici (tableaux 49 à 56) les résultats de comparaison entre les 4 approches de sélections, selon les différentes classifications de profil de demande et de niveau de maturité des pièces.

### ✓ Résultats par classification de profil de la demande

#### • Pièces stables

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>	RIPM <sub>0.7</sub>	RIPM <sub>0.3</sub>	IP	SP
MA	68.2	22.8	62.2	29	35.6	29.2	35
SES	5.4	9.4	10.4	15.4	24.2	16.2	32.4
CR	8.2	15.6	24.8	6.6	7.4	4.8	7.4
SBA	18.2	52.2	2.6	49	32.8	49.8	25.2
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 49: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces stables

#### • Pièces sporadiques

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>	RIPM <sub>0.7</sub>	RIPM <sub>0.3</sub>	IP	SP
MA	6.4	14.4	27	23	27	29.4	23.4
SES	3.8	1.2	5	8	10	4.8	15.4
CR	26.6	14	43	27	29	16.2	27.3
SBA	63.2	70.4	25	42	34	49.8	34
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 50: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces sporadiques

#### • Pièces erratiques

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>	RIPM <sub>0.7</sub>	RIPM <sub>0.3</sub>	IP	SP
MA	23.6	18.6	51.6	25	34.2	27.8	33.4
SES	28.6	15	29.8	25.8	30.2	19.2	25.2
CR	23.2	4.6	16.2	16.8	17.6	11.6	15.2
SBA	24.6	61.8	2.4	32.4	18	41.4	26.2
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 51: Comparaison entre les approches de sélection pour des pièces erratiques

- **Résumé de la performance des méthodes par catégorie de demande**

	<b>Approche1</b>	<b>Approche 2</b>		<b>Approche3</b>		<b>Approche 4</b>	
	<b>Sélection purement statistique</b>	<b>Risque surstock</b>	<b>Risque Service</b>	<b>Priorité stock</b>	<b>Priorité service</b>	<b>Priorité Stock avec Electre</b>	<b>Priorité service avec Electre</b>
<b>Stables</b>	1. SBA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA
	2. MA	2. MA	2. CR	2. MA	2. SBA	2. MA	2. SES
<b>sporadiques</b>	1. SBA	1. SBA	1. CR	1. SBA	1. SBA	1. SBA	1. SBA
	2. CR	2. MA	2. MA	2. CR	2. CR	2. MA	2. CR
<b>Erratiques</b>	1. SES	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA
	2. SBA	2. MA	2. SES	2. SES	2. SES	2. MA	2. SES

**Tableau 52: Résumé des comparaisons entre les approches de sélection par catégorie de demande**

Pour les pièces à demande stable, il convient de remarquer que la dominance de la méthode de la moyenne mobile est moindre quand les critères de gestion de stocks sont prisent en compte, notamment quand la priorité stock est privilégiée.

Pour les pièces sporadiques, nous pouvons, par exemple, constater que la dominance de l'approche SBA lorsque la qualité statistique des prévisions est prioritaire et diminue notablement lorsque les préoccupations logistiques sont renforcées.

Pour les pièces erratiques, si la sélection est équilibrée d'un point de vue statistique, la méthode SBA est par contre mieux évaluée lors de la priorité stock et les approches classiques lors de la priorité niveau de service.

✓ **Résultats par classification de niveau de maturité des pièces**

- **Pièces en introduction**

	<b>Approche1</b>	<b>Approche 2</b>		<b>Approche3</b>		<b>Approche 4</b>	
	<b>MSE</b>	<b>IOE<sub>0.7</sub></b>	<b>IOE<sub>0.3</sub></b>	<b>RIPM<sub>0.7</sub></b>	<b>RIPM<sub>0.3</sub></b>	<b>IP</b>	<b>SP</b>
MA	61.8	63.2	67.4	24.2	42.6	14.4	42.2
SES	7.2	7.8	5	22.8	23.8	30.6	15.6
CR	14.2	1.6	22.4	21.4	16.2	6.8	11.4
SBA	16.8	27.4	5.2	31.6	17.4	48.2	30.8
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

**Tableau 53: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en introduction**

- **Pièces en maturité**

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>	RIPM <sub>0.7</sub>	RIPM <sub>0.3</sub>	IP	SP
MA	33.4	27.8	37.1	27.4	34.6	28.4	31.4
SES	14.2	19.0	19.6	18.4	19.8	16.4	24.4
CR	21.2	12.2	28.1	15.4	18	6.6	15.2
SBA	31.2	41.0	12.8	38.8	27.6	48.6	29.0
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

**Tableau 54: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en maturité**

- **Pièces en fin de vie**

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	MSE	IOE <sub>0.7</sub>	IOE <sub>0.3</sub>	RIPM <sub>0.7</sub>	RIPM <sub>0.3</sub>	IP	SP
MA	24.8	24.0	37	24.6	28.8	33	26.8
SES	12.8	16.6	19.6	18.4	21.6	13.8	26.4
CR	20.8	12.8	28.2	16.8	18.4	7.6	19
SBA	41.6	46.6	15.2	40.2	31.2	45.6	27.8
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

**Tableau 55: Comparaison des approches de sélection pour des pièces en fin de vie**

- **Résumé de la performance des méthodes par niveau de maturité des pièces**

	Approche1	Approche 2		Approche3		Approche 4	
	Sélection purement statistique	Risque surstock	Risque Service	Priorité stock	Priorité service	Priorité Stock avec Electre III	Priorité service avec Electre III
<b>Introduction</b>	1. MA	1. MA	1. MA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA
	2. SBA	2. SBA	2. CR	2. MA	2. SBA	2. SES	2. SBA
<b>Maturité</b>	1. MA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. MA
	2. SBA	2. MA	2. CR	2. MA	2. SBA	2. MA	2. SBA
<b>Fin de vie</b>	1. SBA	1. SBA	1. MA	1. SBA	1. SBA	1. SBA	1. SBA
	2. MA	2. MA	2. CR	2. MA	2. MA	2. MA	2. MA

**Tableau 56: Résumé des comparaisons entre les approches de sélection par niveau de maturité des pièces**

Pour les pièces en introduction, il convient de remarquer la dominance de la méthode de la moyenne mobile, surtout quand il s'agit d'une priorité en service.

Pour les pièces en maturité, si la sélection est équilibrée d'un point de vue statistique, nous pouvons, par contre constater la dominance de l'approche SBA quand il s'agit de priorité stock et la méthode de la moyenne mobile quand il s'agit de priorité stocks.

Pour les pièces en fin de vie, la méthode SBA est souvent la mieux évaluée quel que soit la priorité : statistique, service ou stock.

L'ensemble de ces conclusions renforcent l'intérêt de notre étude dans le sens où elle ne vient pas confirmer l'idée intuitive que la recherche de la meilleure adéquation des prévisions à la demande réelle se traduit par une amélioration des performances au niveau de la politique de gestion des stocks, et ceci pour toutes les catégories de demande et de niveau de maturité de pièces. La probabilité de sélection et la dominance des méthodes changent en fonction de l'approche utilisée et les priorités logistiques.

On peut noter des résultats plus spécifiques sur chacune des approches proposées. On peut aussi remarquer que rarement une méthode surpasse d'une manière significative les autres, mais des suggestions par catégorie, priorité et approche utilisée peuvent être proposées.

Ainsi, au vu de ces résultats, nous proposons de faire évoluer les processus de sélection des modèles de prévision vers le principe général suivant :

1. Définir les priorités de la chaîne logistique en termes d'attente et la classe de la pièce (coût, criticité...). Ceci permet de définir l'approche d'évaluation de performance et le critère associé (choix de la mesure, des poids et des seuils associés).

2. Caractériser la référence étudiée en termes de catégorie de demande et de niveau de maturité de la référence. Cette maturité se détermine en fonction de la taille de l'historique disponible et du cycle de vie de la référence.

Sélectionner la méthode de prévision de la demande :

- 3.1. Cas où l'historique est suffisant :

- a. Tester l'ensemble des méthodes de prévisions en fonction du critère défini au point 1 à chaque nouvelle prévision. Cette analyse peut être facilement automatisée et ne requiert dans ce cas aucun effort de la part de l'analyste. Elle pourra même dans certains des cas être transparente.

- b. Choisir la méthode de prévision la plus performante et actualiser les évaluations de chaque méthode dans la base de données « Catégorie ».

- 3.2. Cas où l'historique n'est pas suffisant (moins que 12 mois ou 36mois selon les auteurs):

a. Identifier la catégorie « la plus proche ». Cette identification pourra se faire essentiellement sur la base de données commerciales et technologiques afin d'étudier des similitudes en termes de technologie, de conditions opératoires et surtout de la catégorie de la demande (stable, erratique, sporadique).

b. Appliquer la méthode de prévision la plus performante dans la catégorie identifiée (les tableaux 49 à 56 peuvent être utilisés).

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté de nouvelles approches de sélection des méthodes de prévision en utilisant notamment une méthode d'analyse multicritères. Ces approches permettent d'intégrer les indicateurs de gestion de stock dans cette sélection (I5). Les résultats ont été par la suite comparés à ceux de l'approche statistique classique de sélection. La comparaison a été faite sur des jeux de données réels de différentes catégories de demande et de niveaux de maturité de pièces de rechange en fonction de plusieurs critères de performance. Les nouveaux critères considérés, permettent de mieux refléter les préoccupations d'entreprise telles que la performance du processus logistique. Le résultat principal de cette analyse est qu'il n'existe pas une unique méthode de prévision surclassant les autres dans tous les cas. Il n'est donc pas possible d'en choisir une a priori. En effet, la méthode la mieux évaluée diffère en fonction de la catégorie de la demande, du niveau de maturité des pièces, de la priorité service ou stock, d'où l'intérêt des mesures proposées.

Force de ce constat, nous avons proposé un principe général pour le processus de sélection de la méthode de prévision. Il est basé sur une évaluation systématique de la performance de plusieurs mesures à chaque nouvelle demande. Par ailleurs, il offre une meilleure adéquation de la méthode de prévision aux priorités d'entreprise en termes de logistique et de gestion des stocks définies pour chaque référence. Cette recherche de spécificités dans le choix de la méthode de prévision par rapport aux caractéristiques de la référence nous semble tout à fait rejoindre les challenges industriels de personnalisation de leurs produits et services.

Cependant, ce besoin de personnalisation est souvent associé à une nécessité de différenciation entre les classes client, or le modèle de gestion de stock utilisé jusqu'à présent ne permet pas de prendre en compte la priorisation client, ainsi le chapitre suivant sera dédié à cette problématique (I6).





# **Chapitre 7 : Processus de gestion des stocks à différents niveaux de service**

## **I. Positionnement et classification des travaux de littérature**

- a. Domaines d'application dans la littérature**
- b. Les politiques de gestion des stocks à différents niveaux de service**
- c. La gestion différenciée des « backorders »**
- d. Critères de classification des travaux de la gestion différenciée des stocks**
- e. L'évaluation de performance des politiques de rationnement**
- f. Pistes pour les travaux de recherche**

## **II. Gestion des stocks à différents niveaux de service sur des prévisions**

- a. Estimation du niveau critique de la politique de rationnement sur des prévisions**
- b. Seuils des politiques de gestion des stocks à différents niveau de service**
- c. Mesures de performance dans le cas de différenciation à deux clients**

## **III. Plan d'expérience et résultats**

- a. Plan d'expérience**
- b. Comparaison de l'impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle**
- c. Comparaison entre les différentes politiques par performance en niveau de service et en niveau d'inventaire**

## Introduction

Les chapitres précédents ont traité la problématique de prévision et de gestion des stocks d'une chaîne logistique des pièces de rechange pour différentes catégories de profil de la demande et de niveau de maturité des pièces, mais se limitent au cas d'un niveau de service commun sans aucune priorisation entre les demandes de la même pièce.

Or, par soucis de personnalisation de l'offre commerciale, les responsables de service de maintenance proposent différents types de contrats avec différents niveaux de rapidité d'intervention. Ceci est associé à différentes exigences de disponibilité des pièces en fonction du type de contrat (classe client).

Cependant, les politiques de gestion des stocks classiques ne permettent pas cette différenciation en niveau du service. Ainsi, la littérature a proposé des politiques à niveaux critiques pour répondre à ce besoin. Après une revue de littérature de cette problématique, l'objectif de ce chapitre est d'adapter les politiques de gestion des stocks basées sur des prévisions au cas d'une différenciation client puis de comparer leurs performances, afin de conclure sur la pertinence de chacune en fonction des segmentations utilisées.

### I. Positionnement et classification des travaux de littérature

#### a. Domaines d'application dans la littérature

De nombreux domaines d'applications de la gestion différenciée des stocks ont été évoqués dans la littérature qui a traité cette problématique. Ils représentaient soit le cas d'étude et d'application industrielle de l'article soit la motivation industrielle d'un travail théorique. Ils peuvent être rassemblés dans les catégories suivantes:

- ✓ *La gestion des stocks en produits* : il s'agit de différencier la gestion des inventaires des systèmes de production en fonction de la classe client des lignes de production. On différencie ici entre la classe client dite « patiente » qui accepte d'être en backorders et la classe client dite « impatiente » qui ne tolère pas des backorders ; sa commande non satisfaite est perdue automatiquement « lost sales » ou génère des pénalités [152].
- ✓ *La gestion des stocks en pièces de rechange ou produits de services* : les exigences du contrat de maintenance imposent le besoin d'avoir une différenciation en fonction de l'importance du type de contrat, le degré de différenciation de la gestion correspond au nombre de contrats types proposés, un client avec un contrat proposant la plus importante réactivité en service est celui qui est considéré comme prioritaire en disponibilité des stocks en pièces de rechange [68].

- ✓ *La criticité de l'implémentation* : dans certaines applications, comme celles de la pétrochimie, une même pièce de rechange d'un même type d'équipement peut être installée dans différents types d'implémentation. Cette dernière peut être critique ou non critique, d'où le besoin de différents niveaux de service pour la même référence pour couvrir différents types d'implémentation [153]. (on parle ici de la criticité des implémentations/systèmes utilisant la pièce et non pas de la criticité de la pièce elle-même définie dans le chapitre 5).
- ✓ *L'échelon de la chaîne logistique* : la différenciation est par rapport au positionnement de l'acteur qui demande la pièce dans la chaîne logistique. L'exemple qu'on peut donner ici est la différenciation entre les demandes du magasin du détaillant et les demandes directes du client final. La priorisation dans ce cas est en fonction de la stratégie de l'entreprise [154].
- ✓ *Hors industrie* : Le besoin de différenciation des stocks ne se limite pas au domaine industriel, on peut donner ici l'exemple de la gestion de la disponibilité des chambres des hôtels ou des places d'avion des compagnies aériennes [155]. La différenciation semble aussi utile dans le domaine médical, comme pour la gestion des transplantations d'organes et le besoin en stock de sang en fonction par exemple de la gravité de l'état du patient [156] [157].

#### **b. Les politiques de gestion des stocks à différents niveaux de service**

Afin de répondre à ce besoin de différenciation en stocks exprimé par les domaines d'application qui ont été présenté ci-dessus, des politiques de gestion de stocks sont utilisées :

##### **i. Les politiques classiques**

Dans l'absence de politiques dédiées à la gestion différenciée, les industries ont tendance à appliquer une des deux pratiques suivantes, pour essayer de satisfaire le niveau de service du client prioritaire.

##### ✓ **Niveau de service commun**

Dans ce cas, le niveau de service le plus élevé de la classe client la plus prioritaire est établi comme le seul niveau de service de la pièce. En d'autres termes l'ensemble des autres classes client, reçoivent un niveau de service surestimé.

*Avantages* : Facilité de la gestion et de la mise en place, les exigences en disponibilité pour les différents types de contrats sont respectées.

*Inconvénients* : Inventaire important, les clients prioritaires ne ressentent pas leur priorisation par rapport aux autres, les clients non-prioritaires ne voient pas l'utilité de demander d'être surclassés.

✓ **Stock séparé**

Dans ce cas pour chaque classe client on crée un stock et une gestion dédiée, il s'agit presque de remplacer chaque référence par des sous-références au nombre des classes clients. Pour une même pièce, une classe client même prioritaire n'a aucune visibilité sur les stocks des autres classes.

*Avantages* : Facilité de mise en place et pour chaque classe client un niveau de service différent.

*Inconvénient* : Inventaire important, multiplication du portefeuille des responsables d'approvisionnement, désynchronisation de la gestion des commandes et du transport logistique.

**ii. Les politiques de rationnement de stocks**

✓ **Rationnement en quantité [108]**

Aussi appelée politique à niveau critique, c'est une sorte de solution intermédiaire entre les deux pratiques classiques, entre la non-séparation et la séparation du stock de la pièce. Il s'agit de la réservation d'une partie du stock commun à certaines classes prioritaires et de priver d'autres moins prioritaires de cette réservation.

En effet, si on considère le cas de deux classes client une prioritaire et l'autre moins-prioritaire, un seul niveau critique est décidé noté souvent **k** ou **CL** (Critical Level). Les deux clients sont servis de la même manière, mais dès que le niveau de stock est inférieur au niveau critique on arrête de servir le client moins-prioritaire et le stock restant est réservé au client prioritaire, en attendant le réapprovisionnement du stock.

De la même manière, dans le cas de  $n$  classes clients,  $n-1$  niveaux critiques sont décidés, seul le client prioritaire n'a aucun niveau critique imposé. La valeur du niveau critique attribuée à chaque classe est décroissante avec la croissance de la priorité associée à cette classe.

✓ **Rationnement en temps [158]**

Aussi appelée politique à temps critique, elle suit la même approche que la politique à niveau critique, sauf que le paramètre de différenciation dans ce cas est le temps plutôt qu'une quantité. Ce temps est souvent ramené à celui restant à la réception de la commande. Ainsi, si le temps restant est long, une priorisation est instaurée, puis levée dès que la réception s'approche.

En effet, en considérant n'avoir que deux classes client une prioritaire et l'autre moins-prioritaire, un seul niveau critique est décidé qu'on note **CT** (Critical Time), en notant le temps d'approvisionnement **L**, avec  $CT < L$ .

Après le lancement d'une commande, si le temps restant à la réception de la commande est supérieur à **CT**, seule la classe prioritaire a droit au stock restant. Une fois le temps restant est inférieur à **CT**, les deux classes clients sont servies. Ainsi, on évitera le risque d'un temps d'attente important des demandes du client prioritaire, en tolérant par suite l'augmentation de celui du client non-prioritaire.

### **c. La gestion différenciée des « backorders »**

Il s'agit d'une problématique supplémentaire dans le cas de la gestion des stocks à différents niveaux de service quand le mode de gestion des commandes est en « backorders » et non pas en « lost sales », on parle de la problématique de « gestion des backorders » ou « du processus d'élimination des backorders ». En effet, comme pour toute politique de gestion des stocks, l'occurrence d'une pénurie de stock « backorder » est probable. La mise en place d'un mécanisme de gestion des priorités entre ces backorders est nécessaire pour définir pour qui on doit attribuer le stock dès sa réception.

Si dans l'absence de la différenciation client, la gestion des backorders se fait souvent en premier arrivé premier servi, dans le cas d'une différenciation client et lors de l'occurrence de backorders chez plus qu'une seule classe clients une problématique se pose, il s'agit de définir comment répartir la commande reçue récemment du fournisseur entre les différentes classes.

En effet, dans le cas de deux classes clients : une prioritaire et l'autre moins-prioritaire, un « backorder » sera créé chez le client prioritaire si et seulement si le stock est nul, mais sera créé chez le client moins-prioritaire dès que le niveau critique est franchi.

Ainsi, deux niveaux de décisions de priorisation sont à prendre dans cette situation [153]:

- ✓ D'abord entre les « backorders » de la classe prioritaire et ceux de la classe moins-prioritaire :
  - Une gestion premier arrivé, premier servi : dans ce cas aucune priorisation n'est faite dans la gestion des « backorders ».
  - Une gestion avec priorité : Dans ce cas la totalité des « backorders » de la classe prioritaire est éliminée avant de traiter ceux de la classe moins-prioritaire.
- ✓ Si la deuxième décision est prise un autre choix est à faire entre les « backorders » de la classe moins-prioritaire et le re-complètement du stock :

- Servir les « backorders » de la deuxième classe, avant de compléter le stock.
- Remplir le stock jusqu'au niveau critique, puis éliminer les « backorders » de la classe moins-prioritaire.

#### d. Critères de classification des travaux de la gestion différenciée des stocks

Nous pouvons classer les articles de la gestion de stocks à différents niveaux de service (tableau 57), selon les différentes caractéristiques qu'ils ont considéré dans le modèle utilisé, qui sont :

- ✓ **Le Nombre de classes clients** : 2 clients/ N clients (>2).
- ✓ **La Nature du temps d'approvisionnement** : Nul/ constant/ exponentiel ou Earling.
- ✓ **Le Mode de gestion des commandes** : Commandes perdues « Lost Sales : LS »/ Commandes en attente « Backorder : BO ».
- ✓ **Le Type de revue du stock** : Revue périodique (T, S) « P » / Revue Continue (s, S) « C ».

#### ✓ Tableau de classification des articles

Critère Classe Article	Nombre de Clients		Type de temps d'approvisionnement			Mode de gestion des commandes		Politique de revue du stock	
	2	N	0	C	Exp	LS	BO	C	P
[107]		×	×				×		×
[159]		×	×			×	×		×
[108]	×		×	×			×	×	
[160]		×			×	×		×	
[153]	×			×			×	×	
[161]		×			×	×		×	
[162]	×			×			×	×	
[163]		×		×		×		×	
[164]		×		×		×		×	
[165]	×				×	×		×	
[166]	×						×	×	
[167]		×		×		×		×	
[168]	×					×		×	
[169]		×		×			×	×	
[170]	×			×			×		×

Tableau 57: Classification des articles de gestion différenciée des stocks

#### **e. L'évaluation de performance des politiques de rationnement**

Les modèles de gestion des stocks avec rationnement en quantité ou en temps dans le cas d'une gestion à différents niveaux de service proposés dans la littérature ont été évalués par des indicateurs de gestion des stocks, ces indicateurs ont permis d'analyser l'effet des paramètres utilisés comme le temps d'approvisionnement, le taux de demande de chaque classe par rapport à la demande totale.

Cependant, on trouvera que certains articles sont orientés évaluation en service et d'autres orientés évaluation en coûts. Souvent, dans le premier après une modélisation basée sur un modèle de niveau de service et dans le deuxième sur la base d'un modèle d'optimisation de coût.

Un exemple de modèle de service est la référence [153] qui après une modélisation du (taux de remplissage) et le temps d'attente moyen de chaque classe, par une approximation mathématique sur la base des hypothèses de base de demande et pour 2 classes clients, fait une évaluation de performance de ces indicateurs service pour différents niveaux de la politique de gestion de stocks à niveau critique et une comparaison des résultats de l'approximation mathématique avec les résultats de simulation.

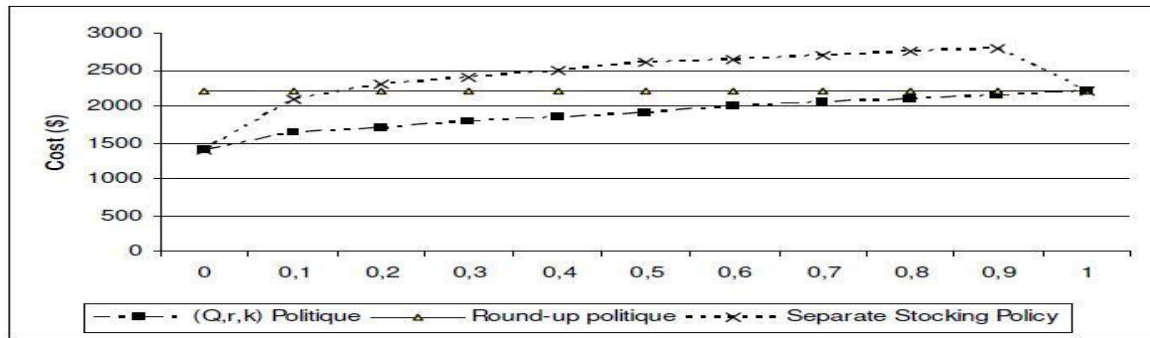
Un exemple de modèle de coût est la référence [169] qui, après une modélisation par processus markovien, sachant que la demande est approximée par la loi de poisson, propose des heuristiques d'optimisation des seuils de la politique de gestion de stocks sur la base d'une fonction coût total. L'évaluation par la suite a été faite par comparaison des résultats de cette fonction coût pour différents couples de la politique ( $s, S$ ).

D'autres références comme [168] font une évaluation sur les deux types d'indicateurs service et coût.

Pour la plupart des articles de gestion des stocks à différents niveaux de service, l'évaluation s'est limitée à une analyse de sensibilité de la politique par rapport à plusieurs paramètres et en utilisant la même politique. Peu d'articles étendent cette évaluation à une analyse comparative entre plusieurs politiques et notamment avec les politiques classiques : comme celle à niveau de service commun et celle du stock séparé.

Mais on peut distinguer l'article [162], qui dans le cas d'une hypothèse de demande selon la loi de poisson d'un modèle à backorders et pour deux classes clients, compare la politique à rationnement avec la politique à niveau de service commun et avec la politique à stocks séparés entre les deux classes.

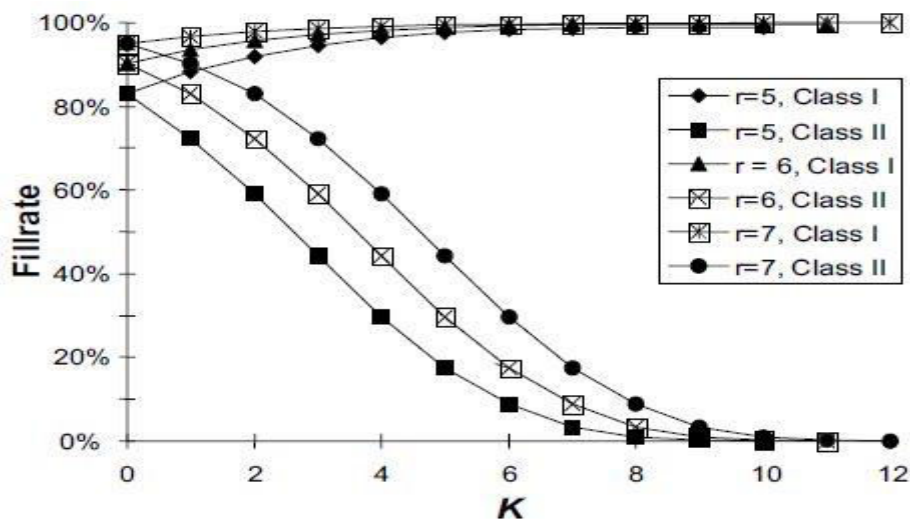




**Figure 29: Comparaison en coûts entre les politiques de différenciation [162]**

Selon cette figure, la performance de la politique de rationnement est supérieure, surtout quand le ratio de la demande de la classe prioritaire augmente. La performance est en termes de coût total qui englobe les coûts de pénalités relatifs à chaque contrat, naturellement plus importants pour les clients prioritaires, ce qui justifie la performance du rationnement dans le cas d'un ratio important entre les coûts de pénalité de chaque contrat.

Cependant, d'un point de vue niveau de service comme l'illustre la figure suivante (figure 30), il est important de noter qu'une amélioration fine du niveau de service de la classe prioritaire quand on est déjà à des niveaux élevés, peut dégrader d'une manière importante le niveau de service de la classe non-prioritaire. Cela est dû au caractère exponentiel de l'évolution du niveau de service.



**Figure 30: Evolution du niveau de service des deux classes [162]**

Finalement, plusieurs références comme [108] et [164] considèrent le cas du niveau critique  $k=0$  dans le cas de l'évaluation de performance, qui illustre la différence entre la performance dans le cas de la réservation de pièces pour la classe prioritaire ou pas. Cependant, ce cas ne veut pas dire qu'aucune différenciation n'est effectuée, surtout dans le cas de la gestion des commandes à backorders. En effet, même dans le cas de  $k=0$  on favorise de servir les backorders de la classe prioritaire avant ceux de la classe non-prioritaire

Pour résumer, le tableau ci-dessous fait une classification des articles de la différenciation du niveau de service en gestion des stocks, par critère d'évaluation de performance et par politique utilisée dans l'analyse de comparaison.

Avec : SL analyse en niveau de service, CT analyse en coût, RP : politique de rationnement, CP : Politique à niveau de service commun, SP : politique à stock séparé.

Critère Classe Article	Orientation de l'évaluation		Politique de différenciation			
	SL	CT	RP	RP (cas CL=0)	CP	SP
[107]	×		×		×	
[159]		×	×			
[108]	×		×	×	×	
[160]		×	×			
[153]	×			×		
[161]		×	×			
[162]	×	×	×		×	×
[163]	×	×	×			
[164]		×	×	×		
[165]		×	×			
[166]	×		×			
[167]		×	×			
[168]	×		×	×		
[169]	×	×	×			
[170]	×	×	×	×	×	×

**Tableau 58: Comparaison entre les articles de différenciation en évaluation de performance**

## **f. Proposition d'améliorations des approches actuelles**

### **i. Politique de gestion de stocks à niveaux critiques sur des prévisions**

La littérature de gestion de stocks à différents classes clients se base sur une hypothèse de demande pré définie et non pas sur des calculs prévisionnels ainsi qu'une erreur prévisionnelle. En même temps la littérature de gestion de stock à niveau de service commun propose des politiques de gestion des stocks sur des prévisions et souligne leurs différences par rapport aux politiques de gestion des stocks sur des demandes (chapitre 5). Par ailleurs, dans le cas des politiques de différenciation basées sur des prévisions aucun calcul du niveau

critique n'a été proposé. En effet, ce niveau est considéré comme un paramètre ajustable, qu'on fait varier lors de la simulation pour visualiser la performance du modèle.

Par conséquent, si dans le cas de la gestion à niveau de service commun, des calculs des seuils des politiques basées sur des prévisions types  $(s_i, S_i)$  ont été proposés pour remplacer les politiques classiques basées sur la demande de type  $(s, S)$  [141], on ne retrouve pas des modélisations de politiques du type  $(s_i, k_i, S_i)$  pour remplacer les politiques du type  $(s, k, S)$ .

## **ii. Impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle**

Dans la littérature, l'impact de la différenciation des stocks a été évalué par les indicateurs classiques de gestion de stocks, notamment en impact sur les niveaux de stocks et en niveaux de service.

Cependant, un autre indicateur est impacté par cette différenciation il s'agit de l'erreur prévisionnelle, car le besoin de granularité en estimation de demande (par classe client) peut impacter la qualité de la prévision finale. Bien que l'objectif final soit la performance en indicateurs de gestion des stocks, il convient de mesurer l'impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle.

## **iii. Décision de rationnement selon la classification**

Pour la plupart des articles de rationnement soit on utilise uniquement la politique à niveau critique, soit on fait une comparaison entre différentes politiques (exp : entre rationner ou ne pas rationner), la conclusion est souvent l'efficacité d'une seule politique.

On ne retrouve pas une procédure qui permet de déterminer dans quel cas il est plus efficace de rationner et dans quel cas il est plus efficace de ne pas utiliser un rationnement. On peut imaginer par exemple que dans le cas d'une demande très faible le rationnement pourra fortement dégrader le niveau de service de la classe moins prioritaire et par suite le niveau de service commun.

Ces critères de décision peuvent être : le ratio de demande entre les classes clients, la variabilité de la demande, intermittence de la demande, âge de la pièce, classification en coût unitaire, classification en criticité.

## **iv. Décision de décentralisation des pièces pour différentes classes clients**

La littérature de rationnement propose de réserver du stock pour la classe prioritaire. Nous proposons dans ce point de différencier en plus par position de la pièce de rechange dans le réseau, selon le nombre d'échelons de ce réseau, ainsi la différenciation sera au niveau de temps de livraison et donc la proximité de la pièce du client dans la chaîne logistique.

Par exemple, si une décision de décentralisation des pièces vers un échelon inférieur est prise, notamment pour les pièces à demande locale rare et souvent stock local unitaire, dans ce cas seul le client prioritaire aura accès à la pièce disponible localement, les autres classes auront seul droit aux pièces disponibles au niveau supérieur.

#### **v. Définition du nombre de classes clients**

La majorité des articles de rationnement soient proposent un modèle à 2 clients ou  $n$  clients, ou deux études indépendantes, la première à 2 classes puis une généralisation à  $n$  classes. Aucun article de la littérature ne propose une méthodologie de décision du nombre de séparations entre la clientèle qu'on peut atteindre sans pour autant impacter les indicateurs de performances communs.

Intuitivement, on peut imaginer que si le nombre de classes clients augmente d'une manière très importante, le niveau de stocks en main peut augmenter (à cause des réservations), sans que le niveau de service ne s'améliore pour autant vers les niveaux souhaitables et peut générer une augmentation importante en inventaire.

Nous essayons dans la section suivante de répondre aux trois premiers points (i, ii, iii), par soucis de cohérence avec les travaux des chapitres précédents qui se sont focalisés sur les problématiques de prévision et de gestion de stocks et l'interaction entre les deux. Nous ne traiterons pas le 4<sup>ème</sup> point (iv) car nous ne considérons pas la problématique de la chaîne logistique à différents échelons dans cette thèse, ni la dernière limite (v) car nous nous limitons au cas de deux classes clients.

## II. Gestion des stocks à différents niveaux de service sur des prévisions

On considère dans la suite seulement le cas de 2 classes clients, une prioritaire notée **classe 1** et une moins prioritaire **classe 2**, ainsi que l'ensemble des notations suivantes (tableau 59):

Notation	Signification
<b>L</b>	: le temps d'approvisionnement
<b>N</b>	: la durée de comparaison/d'évaluation de performance
<b>D<sub>i</sub></b>	: la demande réelle commune à la période i
<b>D1<sub>i</sub></b>	: la valeur de l'alternative j par le critère k
<b>D2<sub>i</sub></b>	: la demande réelle à la période i de la classe 2
<b>γ</b>	: le ratio de la demande de la classe 1 $\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N D1i}{\sum_{i=1}^N Di}$
<b>F<sub>i+k</sub><sup>(i)</sup></b>	: la prévision commune à la période i pour la période i+k
<b>F1<sub>i+k</sub><sup>(i)</sup></b>	: la prévision à la période i pour la période i+k de la classe 1
<b>F2<sub>i+k</sub><sup>(i)</sup></b>	: la prévision à la période i pour la période i+k de la classe 2
<b>SL</b>	: le niveau de service commun requis
<b>SL1</b>	: le niveau de service requis pour la classe 1
<b>SL2</b>	: le niveau de service requis pour la classe 2
<b>RSL</b>	: Le niveau de service réel commun
<b>RSL1</b>	: le niveau de service réel de la classe 1
<b>RSL2</b>	: le niveau de service réel de la classe 2
<b>BO<sub>i</sub></b>	: le nombre de Backorders générés à la période j pour les deux classes
<b>BO1<sub>i</sub></b>	: le nombre de Backorders générés à la période j pour la classe 1
<b>BO2<sub>i</sub></b>	: le nombre de Backorders générés à la période j pour la classe 2
<b>MSE<sub>i</sub></b>	: l'erreur de prévision commune calculée à la période i
<b>MSE1<sub>i</sub></b>	: l'erreur de prévision de la classe 1 calculée à la période i
<b>MSE2<sub>i</sub></b>	: l'erreur de prévision de la classe 2 calculée à la période i
<b>OH<sub>i</sub></b>	: le niveau de stock commun à la période i
<b>OH1<sub>i</sub></b>	: le niveau de stock de la classe 1 à la période i (dans le cas d'un stock séparé)
<b>OH2<sub>i</sub></b>	: le niveau de stock de la classe 2 à la période i (dans le cas d'un stock séparé)

Tableau 59: Notations pour les modèles de gestion de stocks à différents niveaux de service

### a. Estimation du niveau critique de la politique de rationnement sur des prévisions

Nous considérons les politiques à niveau de service commun sur des prévisions, comme base de ces politiques.

Dans le cas de deux classes clients avec nécessité de différenciation du niveau de service entre les deux classes, tout en utilisant un stock commun, les politiques (s,k,S), (T,K,S) et (T,R,KR,Q) doivent évoluer vers de nouvelles politiques (si, ki, Si), (T, Ki, Si), (T, Ri, KRi, Qi). Notons  $CL_i$  le niveau critique qui sera égal à  $ki$ ,  $Ki$  ou  $KRi$  selon la politique utilisée.

Nous gardons les mêmes calculs des seuils pour  $si$ ,  $Si$ ,  $Ri$  et  $Qi$  et nous proposons une méthode de calcul de ces niveaux critiques.

Nous considérons un mode de gestion des commandes à backorders et le mode de gestion des backorders suivants : *si le niveau de stocks est supérieur au niveau  $CL_i$  aucune différenciation des commandes client n'est considérée, sinon seules les commandes clients de la première classe sont servies*. Lors de la réception d'une commande du fournisseur, les backorders de la première classe sont servis en premier, puis ceux de la deuxième classe, avant de remplir les stocks.

Pour toutes les politiques nous considérons  $CL_i$  inférieur au seuil déclenchant la commande, on considère par cette hypothèse classique de la littérature qu'on ne peut pas arrêter de servir le client moins-prioritaire si aucune commande n'est déclenchée.

#### ✓ Estimation des calculs de $CL_i$

Le principe de cette estimation est de faire en sorte que le stock disponible permet de satisfaire le client prioritaire pendant la période avant la réception de la commande selon le niveau de service requis  $SL_1$ .

Notons  $m$  le temps restant à la réception de la commande déclenchée par les seuils de réapprovisionnement du niveau commun.

$$m \in \{1, \dots, L\}$$

Le calcul des seuils des politiques de stocks classiques, permettent de satisfaire la demande pendant la période du temps d'approvisionnement  $L$ .

De la même logique, nous considérons que l'objectif du niveau critique est de satisfaire le niveau de service de la classe 1 pendant la période restante à la réception de commande  $m$ .

On arrête de servir la classe 2 quand le niveau de stock est inférieur à l'estimé nécessaire pour couvrir le niveau de service requis pour la classe 1 pendant cette période.

Ainsi, sur la base de ces considérations, du tableau des politiques sur des prévisions à niveau de service commun du chapitre 5 (cf. tableau 37) et de l'hypothèse que  $CL_i < si$ , on peut

rapprocher l'estimation du niveau critique pendant la période m pour couvrir la classe client 1, avec le calcul du stock de sécurité commun pour la période de temps d'approvisionnement L :  
On rappelle :

$$s_i = f^{-1}(1 - SL) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE_i} + \sum_{k=0}^{LT-1} F_{i+k}^{(i)}$$

Ainsi, on peut estimer  $k_i$  par cette formule dans le cas de la politique ( $s_i, k_i, S_i$ ):

$$k_i = \min \left( f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{m} \times \sqrt{MSE1_i} + \sum_{k=0}^{m-1} F1_{i+k}^{(i)}, s_i \right)$$

### b. Seuils des politiques de gestion des stocks à différents niveau de service

Nous reprenons le tableau 37 de la politique de prévision sur des prévision ( $s_i, S_i$ ) (chapitre 5) et nous l'adaptions dans le cas de la différenciation à deux clients, ainsi le tableau ci-dessous résume les estimées des seuils de politiques de gestion de stocks suivantes : la politique à rationnement (à niveau critique), la politique à stock commun, la politique à stock séparé

Paramètres	Politique à Rationnement ( $s_i, k_i, S_i$ )	Politique à Stock Commun ( $s_i, S_i$ )	Politique à Stock Séparé ( $s1_i, s2_i, S1_i, S2_i$ )
<b><math>s_i</math></b>	$f^{-1}(1 - SL) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE_i} + \sum_{k=0}^{LT-1} F_{i+k}^{(i)}$		
<b><math>s1_i</math></b>			$f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE1_i} + \sum_{k=0}^{LT-1} F1_{i+k}^{(i)}$
<b><math>s2_i</math></b>			$f^{-1}(1 - SL2) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE2_i} + \sum_{k=0}^{LT-1} F2_{i+k}^{(i)}$
<b><math>S_i</math></b>	$f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE1_i} + \sum_{k=0}^{LT} F_{i+k}^{(i)}$		
<b><math>S1_i</math></b>			$f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE1_i} + \sum_{k=0}^{LT} F1_{i+k}^{(i)}$
<b><math>S2_i</math></b>			$f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{L} \times \sqrt{MSE2_i} + \sum_{k=0}^{LT} F2_{i+k}^{(i)}$
<b><math>k_i</math></b>	$\min \left[ f^{-1}(1 - SL1) \times \sqrt{m} \times \sqrt{MSE1_i} + \sum_{k=0}^{m-1} F1_{i+k}^{(i)}, s_i \right]$		

Tableau 60: Calcul des seuils des politiques de différenciation sur des prévisions

**Remarque 1 :** De la même manière on peut construire les politiques types (T,Si) et (T,Ri,Qi).

**Remarque 2:** Dans le cas de l'utilisation d'une politique à stock commun sans différenciation, mais en même temps une nécessité de satisfaction du client prioritaire, on prend comme hypothèse qu'une surestimation du niveau de service est considérée  $SL=SL1$ .

**Remarque 3 :**  $F_i \neq F1_i + F2_i$ ;  $MSE_i \neq MSE_{i1} + MSE_{i2}$ ;  $s_i \neq s_{i1} + s_{i2}$ ;  $Si \neq Si1 + Si2$

Aucune contrainte d'égalité n'est imposée sauf si la simulation génère aléatoirement une égalité.

**Remarque 4:** le paramètre m peut être calculé soit par déclenchement d'un compteur z dès la passation d'une commande, dans ce cas  $m=L-z$  soit en utilisant la base de données des commandes qui souvent contient l'information de la date de réception prévue de la commande (Due date), dans ce cas  $m=DD-CD$  (Avec DD due date et CD la date actuelle « Current date »).

Finalement, il est nécessaire de signaler que dans la configuration actuelle des solutions proposées, nous considérons comme objectif de satisfaire un niveau de service de la classe prioritaire, tout en gardant le même objectif du niveau de service commun entre ces deux classes. Cette configuration est fréquente dans le cas des applications industrielles, les entreprises désirent favoriser leur client prioritaire (pour des raisons commerciales...) afin de répondre à une exigence contrat, tout en gardant une bonne mesure globale de leur niveau de service (image de l'entreprise, métriques internes...) sans pour autant augmenter l'inventaire.

### c. Mesures de performance dans le cas de différenciation à deux clients

#### ✓ Mesure d'impact sur l'erreur prévisionnelle

Pour mesurer l'impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle, nous mesurons le ratio entre les erreurs prévisionnelles des deux classes de la demande par rapport à l'erreur prévisionnelle de la demande commune.

Le ratio en erreur prévisionnelle de la différenciation **DFER** (differentiation forecast error ratio) avec :

$$DFER_i = \frac{MSE1_i + MSE2_i - MSE_i}{MSE_i}$$

#### ✓ Mesures de services

De la même manière de calcul de niveau de service réel, dans le cas d'une gestion de stock sans différenciation (chapitre 5), nous reprenons le calcul du niveau de service réel pour les classes 1 et 2, ainsi que le niveau de service réel commun :



$$\mathbf{RSL1} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N BO1_i}{\sum_{i=1}^N D1_i}$$

$$\mathbf{RSL2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N BO2_i}{\sum_{i=1}^N D2_i}$$

$$\mathbf{RSL} - \frac{\sum_{i=1}^N BO1_i + \sum_{i=1}^N BO2_i}{\sum_{i=1}^N D1_i + \sum_{i=1}^N D2_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N BO_i}{\sum_{i=1}^N D_i}$$

#### ✓ Mesures d'inventaire

Nous mesurons l'impact sur le niveau de stock commun de la même manière que dans le cas de la gestion sans différenciation par la mesure d'inventaire relatif à la demande.

Le niveau d'inventaire relatif (Relatif inventory level) :

$$\mathbf{RIL} = \frac{\sum_{i=1}^N OH_i}{\sum_{i=1}^N D_i}$$

Seul dans le cas de la politique à stock séparé qu'il faut consolider les deux niveaux de stocks dans la mesure, dans ce cas on notera en plus  $OH1_i$  et  $OH2_i$ .

$$\mathbf{RIL} = \frac{\sum_{i=1}^N OH1_i + \sum_{i=1}^N OH2_i}{\sum_{i=1}^N D_i}$$

### III. Plan d'expérience et résultats

#### a. Plan d'expérience

Nous considérons le même plan d'expérience que les chapitres précédents avec les mêmes segmentations de profil de la demande et celle du niveau de maturité des pièces (voir le détail du plan d'expérience en chapitre 4).

Nous considérons un temps d'approvisionnement fixe à 5 périodes.

Nous considérons trois scénarios de ratio de la demande de la classe prioritaire:

$$\gamma = \{0.3, 0.5, 0.7\}.$$

Nous considérons trois scénarios de niveau de service théorique commun : 90%, 95%, 97%.

Pour chacun des scénarios nous utilisons un besoin de niveau de service théorique de la classe prioritaire (classe 1) de deux points de plus, respectivement : 92%, 97%, 99%.

Pour la politique à stock séparé il faut définir en plus le niveau de service théorique de la classe non-prioritaire (classe 2). Nous utilisons dans ce cas une dégradation du niveau de service de 5 points, respectivement : 85%, 90%, 92%. ( tableau 61)

Scénarios	Niveau de service théorique commun	Niveau de service théorique classe 1	Niveau de service théorique classe 2 (pour la politique à stock séparé)
Scénario 1 : Niveau de service faible	90%	92%	85%
Scénario 2 : Niveau de service moyen	95%	97%	90%
Scénario 3 : Niveau de service haut	97%	99%	92%

**Tableau 61: Les 3 scénarios de niveau de service théorique utilisé**

Nous mesurons l'impact de la différenciation sur le ratio de l'erreur prévisionnelle pour les différents segments de variabilité de demande et de niveau de maturité des pièces.

Nous mesurons le niveau de service réel de la classe 1, 2 ainsi que le niveau de service réel commun respectivement RSL1, RSL2, RSL et nous mesurons le niveau d'inventaire relatif commun RIL. Nous comparons les résultats des mesures de service et d'inventaire des trois politiques, à niveau critique, à stock commun et à stock séparé : (si,ki,Si), (si,Si) et (s1i,S1i,s2i,S2i) pour les différents segments de profil de la demande et de niveau de maturité des pièces de rechange.

#### **b. Comparaison de l'impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle**

Ici on représente les résultats de la mesure DFER sur la période de comparaison N pour le plan d'expérience détaillé ci-dessus (tableaux 62 et 63).

##### **✓ Par segmentation de profil de la demande**

	$\gamma = 0.3$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 0.7$
<b>Stable</b>	9%	6%	8%
<b>Sporadique</b>	20%	18%	21%
<b>Erratique</b>	15%	12%	16%

**Tableau 62: Impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle par catégorie de demande**

Les pièces stables sont les moins impactées par la différenciation, par contre l'erreur prévisionnelle se dégrade d'une manière importante pour les pièces sporadiques. La rareté de la demande dans ce cas rend la qualité de prévision beaucoup moins bonne lors de la séparation de la demande. Ceci est encore plus important quand le ratio de la demande entre les deux classes n'est pas équilibré, ce qui rend la demande d'une classe très faible par suite plus difficile à prévoir.

✓ **Par segmentation de niveau de maturité des pièces**

	$\gamma = 0.3$	$\gamma = 0.5$	$\gamma = 0.7$
<b>Introduction</b>	16%	14%	17%
<b>Maturité</b>	7%	5%	8%
<b>Fin de vie</b>	19%	17%	19%

**Tableau 63: Impact de la différenciation sur l'erreur prévisionnelle par niveau de maturité des pièces**

Les pièces en maturité sont les moins impactés par la différenciation ils sont plus facilement prédictibles même avec une différenciation de la demande. Par contre l'erreur prévisionnelle se dégrade d'une manière importante pour les pièces en introduction et en fin de vie, le changement de la demande plus important dans ce cas rend la détection de ces changements plus difficile lors de la séparation de la demande. Ceci est encore plus important quand le ratio de la demande entre les deux classes n'est pas équilibré, ce qui rend la demande d'une classe très faible par suite plus difficile à prévoir.

**c. Comparaison entre les différentes politiques par performance en niveau de service et en niveau d'inventaire**

Les figures suivantes (figures 31 à 36) représentent les résultats de comparaison entre les trois politiques : stock commun, stock à niveau critique, stock séparé, pour les différents scénarios de ratio de demande et de niveaux de service théoriques, pour différentes catégories de profil de demande et de niveau de maturité des pièces.

Pour chaque catégorie et chaque scénario, on représentera à gauche les graphiques des résultats en niveau de service et à droite les graphiques des résultats en niveau d'inventaire.

✓ Par segmentation de profil de la demande

• Pièces stables

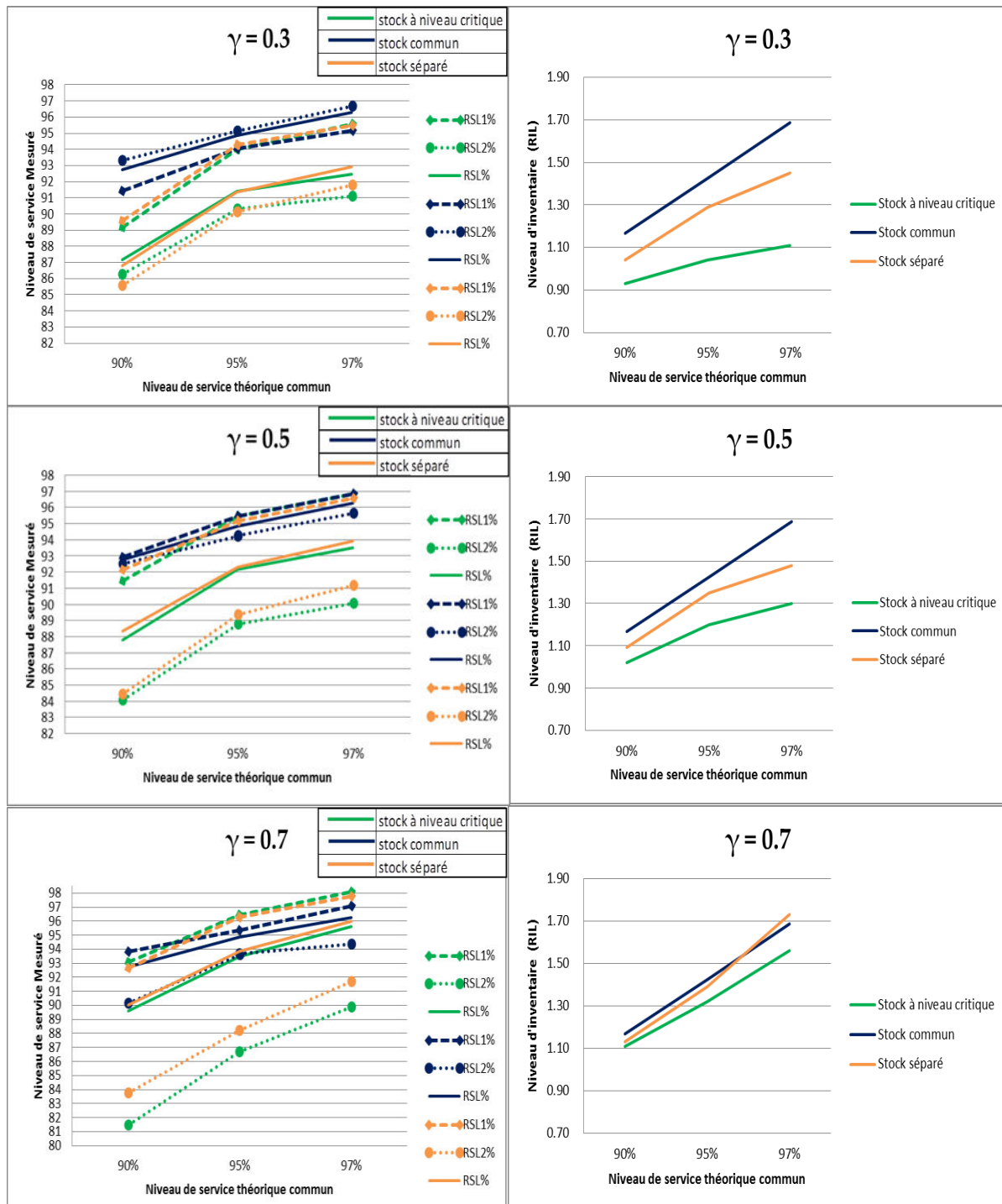


Figure 31: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces stables

- Pièces sporadiques

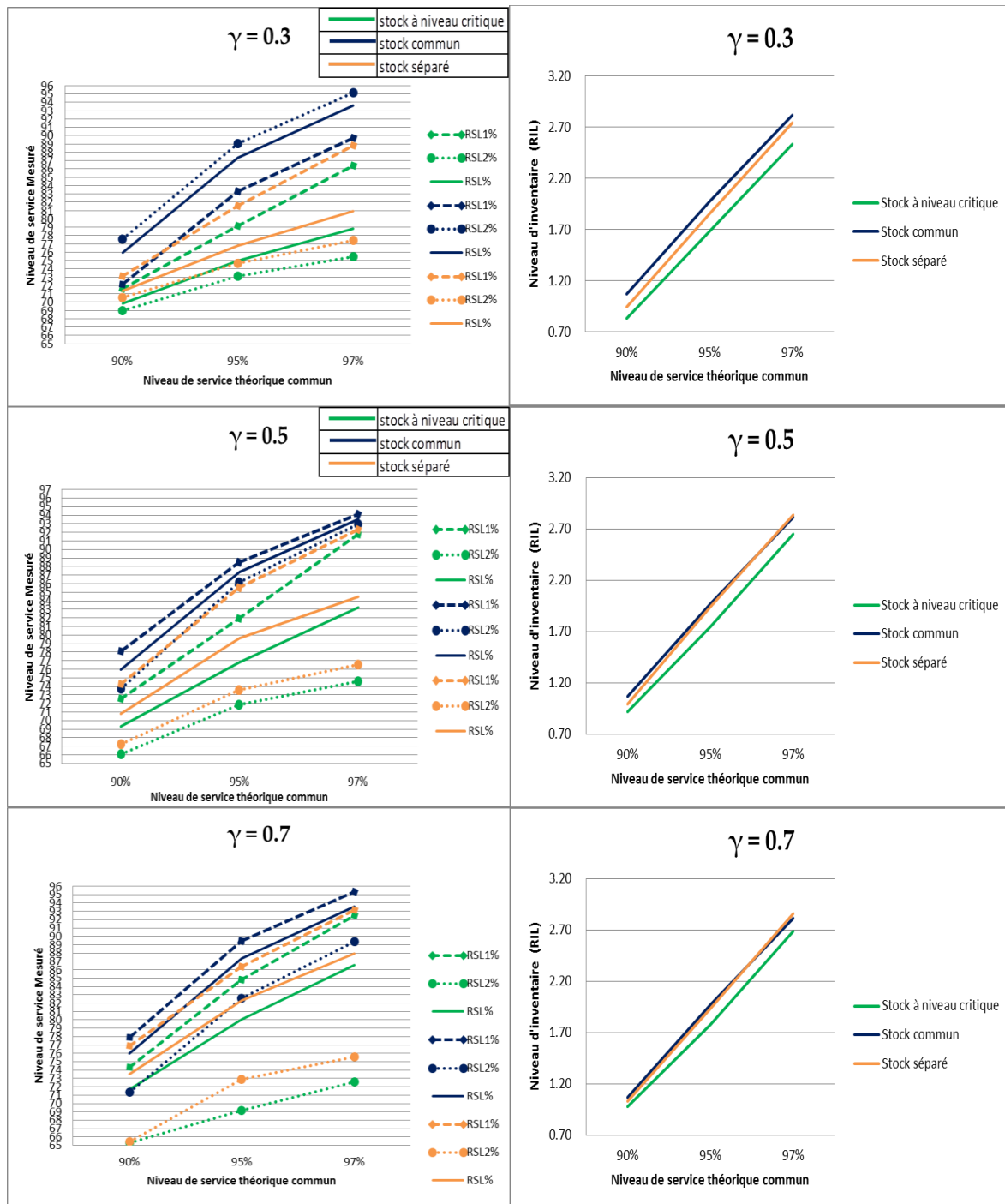


Figure 32: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces sporadiques

- Pièces erratiques

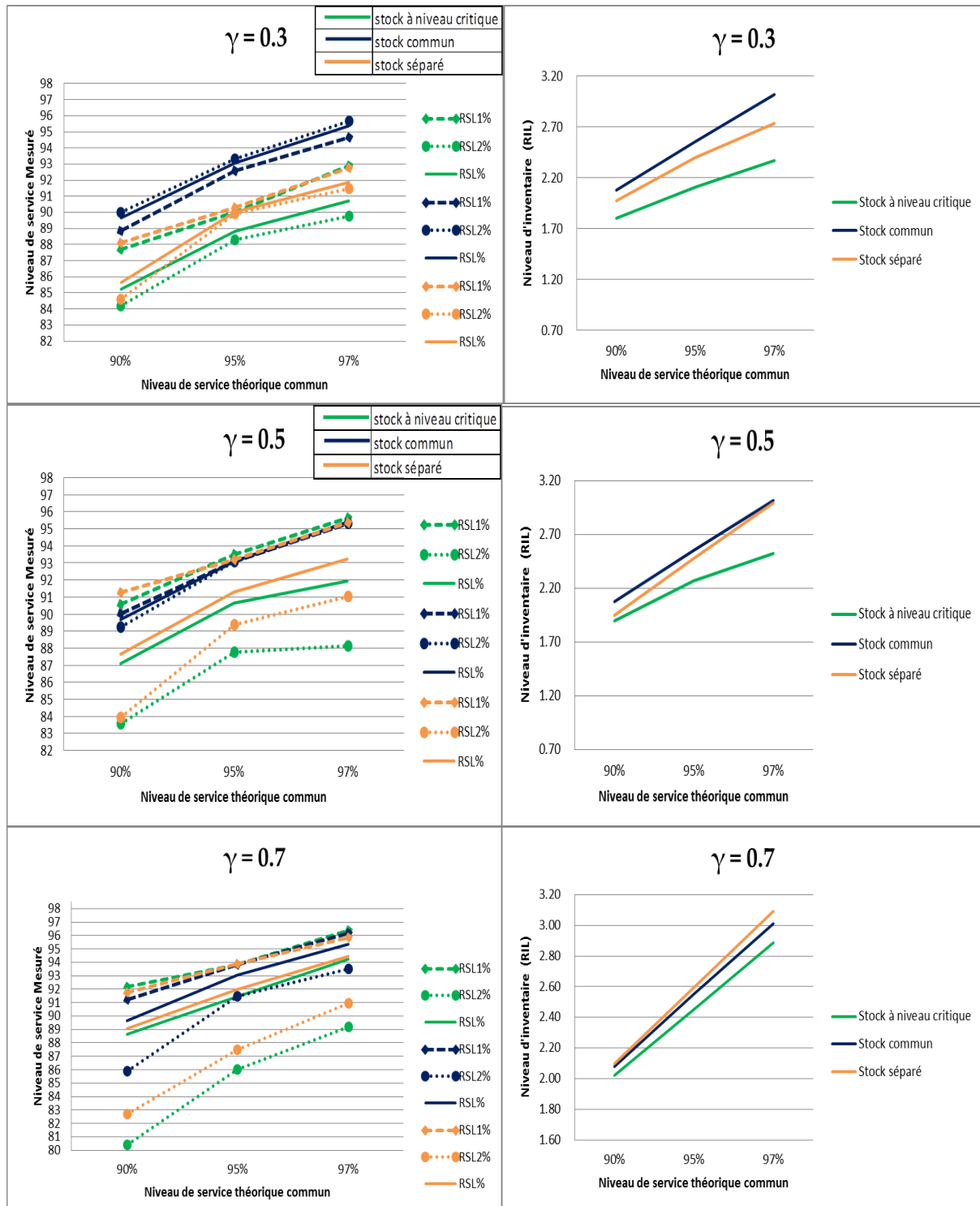


Figure 33: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces erratiques

✓ Par segmentation de niveau de maturité des pièces

• Pièces en introduction

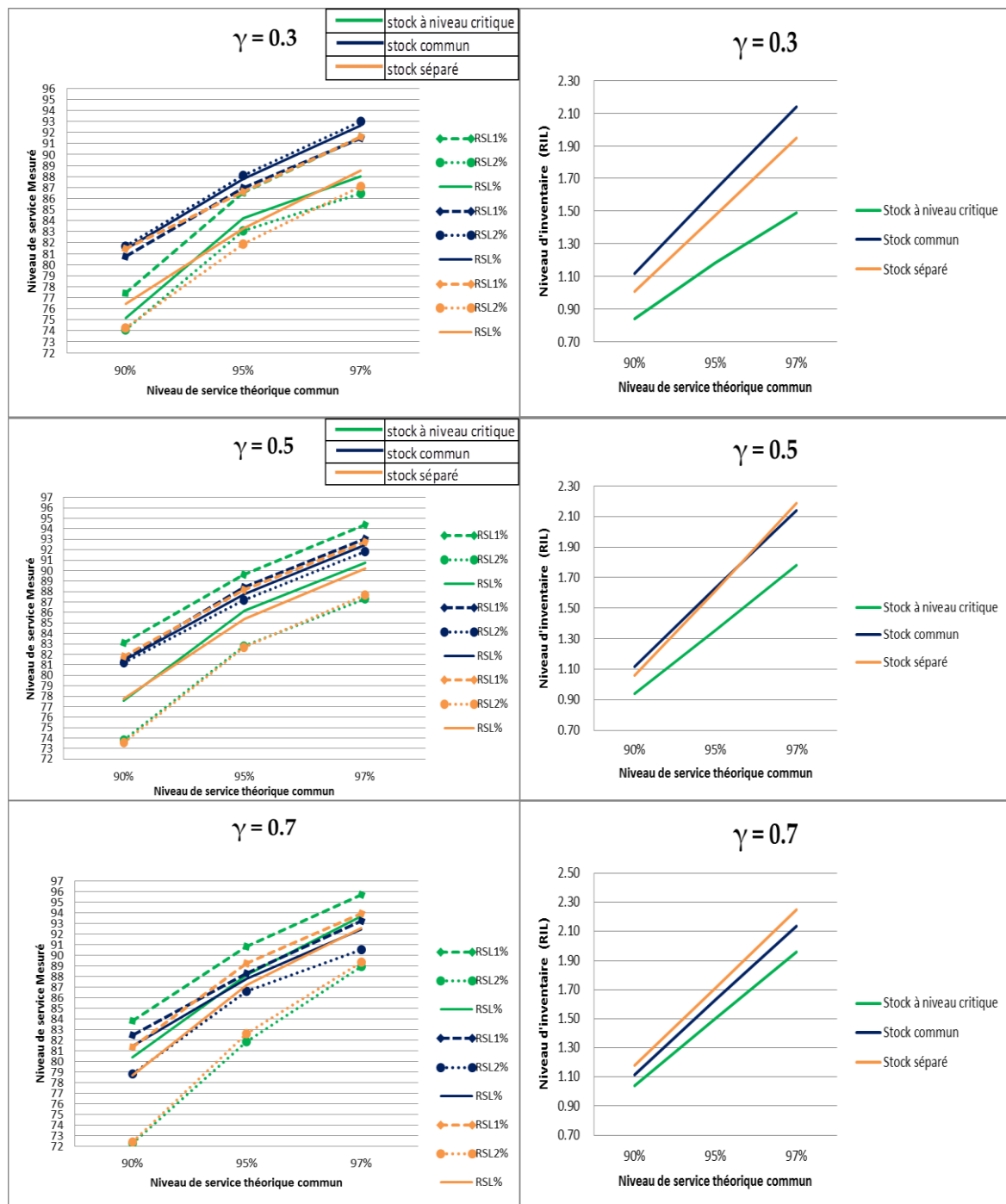


Figure 34: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en introduction

- Pièces matures

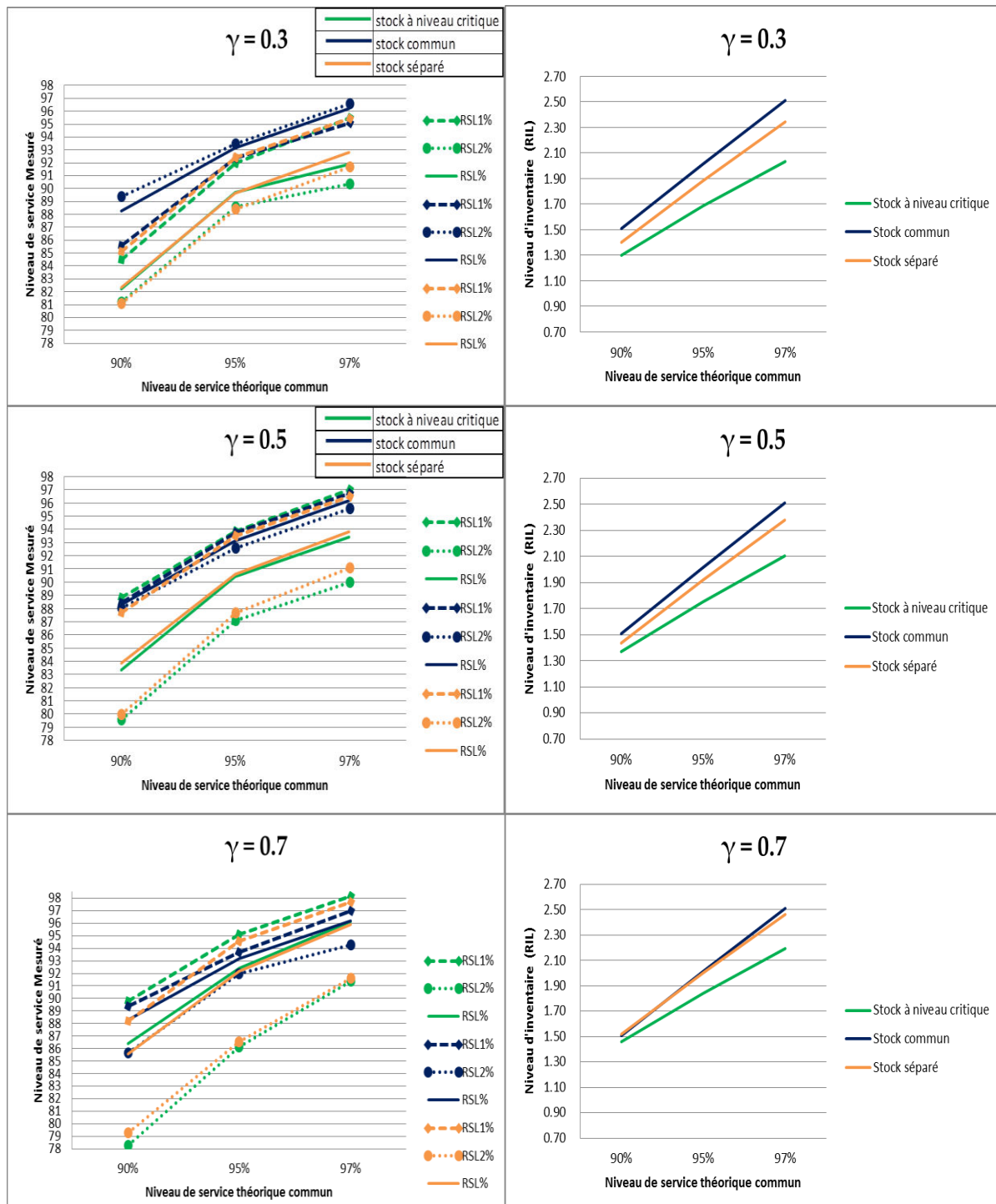


Figure 35: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en maturité



- Pièces en fin de vie

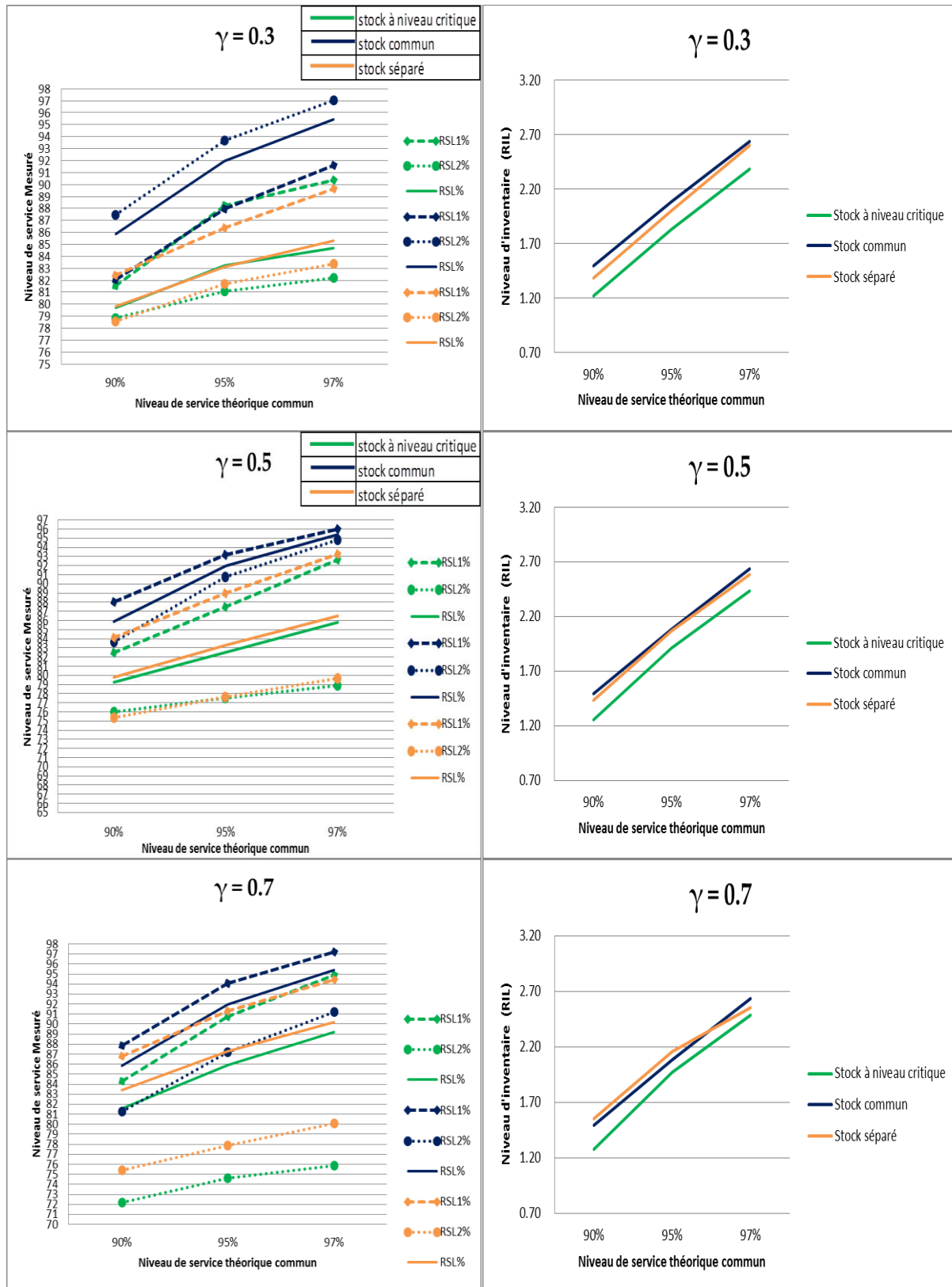


Figure 36: Comparaison entre les 3 politiques de gestion de stocks pour des pièces en fin de vie

Le constat le plus clair de ces résultats est la bonne performance en inventaire de la politique à niveau critique par rapport aux deux autres politiques pour les différentes catégories et pour différents ratio de demande et différents niveaux de service théorique utilisés dans la comparaison (graphes à droite). Profitant de sa qualité de rationnement de stock sans surestimer l'inventaire pour les clients moins-prioritaire.

Ainsi le niveau d'inventaire de la politique à stock commun est souvent le plus important car il surestime le niveau de service pour la demande de la classe moins-prioritaire, il est donc beaucoup plus important quand le ratio de la demande de cette classe est majoritaire.

La politique à stock séparé est pénalisée par sa séparation du stock en deux ce qui double le besoin en stock de sécurité ceci est encore plus visible quand la demande est erratique, ou en phases d'introduction et de fin de vie, la variation de la demande dans ces cas augmentent d'une manière importante les stocks de sécurité.

D'un point de vue performance en niveau de service, le classement des politiques change d'une manière importante en fonction de la catégorie et des scénarios considérés, on peut constater par exemple que la politique à niveau critique permet d'atteindre un meilleur niveau de service pour la classe prioritaire quand la demande est stable ou la pièce est en phase d'introduction ou de maturité. L'écart est encore plus en sa faveur quand le niveau de service requis est important, dans ce cas le niveau critique protège mieux la classe prioritaire.

La politique à niveau de stock commun atteint un meilleur niveau de service pour la classe prioritaire quand la demande sporadique ou les pièces sont en phase de fin de vie, la qualité prévisionnelle faible dans ces cas rend les niveaux de protection des autres politiques moins précis. Cette même politique a souvent un meilleur niveau de service réel commun car elle surestime le niveau de service requis de la classe moins-prioritaire alors que la politique à niveau critique et à stock séparé dégrade naturellement le niveau de cette deuxième classe.

Finalement, la performance de la politique à stock séparé en niveau de service est souvent proche de celle de la politique à niveau critique mais génère un niveau d'inventaire plus important.

## Conclusion

La flexibilité de la chaîne logistique est nécessaire pour répondre aux besoins de personnalisation de la qualité de service de l'entreprise par classe produit ou client. La gestion des stocks étant une des fonctions de la gestion de la chaîne logistique est par conséquent concernée par ce besoin de flexibilité. Si la considération des différentes classifications des pièces de rechange, en proposant un niveau de service dédié à chaque classe de pièce, est une pratique courante dans les entreprises, ces dernières rencontrent plus de difficultés quand il s'agit de considérer la classification client dans le modèle de gestion des stocks.

Ainsi, ce chapitre débute par une revue de littérature des solutions proposées pour répondre à cette problématique de gestion de stocks avec différentes classes clients. Cette partie a eu comme objectif d'organiser ces travaux par catégories afin d'identifier un ensemble d'opportunités d'amélioration. Sur la base de ces conclusions, une adaptation des politiques de gestion des stocks basées sur des prévisions a été proposée, puis ces politiques ont été comparées par les mêmes segmentations utilisées dans les chapitres précédents et pour différents scénarios (I6).

Ce chapitre a confirmé la performance de la politique de gestion des stocks à niveau critique par rapport à la politique à stock commun et la politique à stock séparé d'un point de vue niveau d'inventaire quelle que soit la catégorie de la pièce, mais souligne sa limite par rapport aux autres politiques en niveau de service quand il s'agit de demande sporadique et pour des pièces en fin de vie.

Tant qu'il n'existe pas une politique qui surpasse les autres pour toutes les catégories de pièces en performance service et inventaire, il convient que les décideurs définissent d'abord leur priorité en service ou stock pour chaque classe de pièces par exemple par des segmentations en coût unitaire, en criticité, etc., puis sélectionnent en fonction du ratio de demande de chaque classe client et le niveau de service requis, son profil de la demande et son niveau de maturité, la politique à utiliser pour chaque classe de pièces de rechange

# Conclusion générale

Dans ces travaux nous avons traité la problématique de segmentation de prévision et de gestion de stocks en chaîne logistique des pièces de rechange à différents niveaux de service. L'objectif que nous nous sommes fixé était d'apporter des contributions à cette problématique afin de mieux répondre à sa finalité c'est-à-dire l'amélioration du niveau de service et l'optimisation d'inventaire tout en prenant compte certaines caractéristiques particulières des pièces de rechange.

La gestion de la chaîne logistique des pièces de rechange est complexe mais indispensable. Complexe, compte tenu des nombreux flux de la chaîne, du profil de la demande, du risque de faible rotation, de l'obsolescence de l'inventaire et d'un besoin de répondre à différents niveaux de service en fonction de la priorité du contrat de maintenance et de la criticité des pièces. Indispensable, car elle permet de remplir les engagements de l'entreprise en rapidité d'intervention de maintenance à travers l'amélioration de la disponibilité des pièces et de réduire les coûts de transport et d'inventaire à travers la synchronisation des flux et le partage des stocks entre les techniciens de maintenance.

La prévision et la gestion des stocks sont des fonctions clés de cette chaîne. En effet la qualité de leurs sorties est garante du meilleur compromis entre niveaux de service et d'inventaire. Dans cette mémoire le lecteur trouve une description de l'ensemble d'outils utilisés par la littérature dans ces processus, ainsi qu'une analyse critique de ces travaux qui a soulevé les principaux points suivants :

- Segmentation : L'absence d'une approche de segmentation commune à ces deux processus et l'absence d'utilisation d'une segmentation en phases de vie des pièces dans la sélection des modèles et l'évaluation des performances.
- Evaluation des performances : L'absence d'une combinaison de méthode de prévision et modèle de gestion de stocks dans l'évaluation de performances, la sélection des méthodes de prévision se limite à des mesures statistiques.
- Différenciation clients : L'absence de modèles de gestion de stocks basés sur des prévisions dans le cas de la différenciation client et d'une comparaison avec les politiques classiques en fonction de la segmentation des pièces de rechange.

Afin de répondre à ces constatations, les contributions de ces travaux à cette problématique ont été présentées en 4 phases. Ces phases constituent ensemble l'enchaînement d'une démarche de mise en place d'un processus de prévision et de gestion de stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange à différents niveaux de service:

- Processus de prévision : Une segmentation en niveau de maturité des pièces a été utilisée et la performance des méthodes de prévision en fonction de chaque phase a été analysée. Des

méthodes de prévision hybrides ont été proposées permettant la combinaison entre les caractéristiques de chaque méthode, des mesures de sélection des méthodes de prévision ont été présentées permettant d'utiliser l'information du temps d'approvisionnement et le risque de surestimation ou sous-estimation de la demande.

- Processus de gestion des stocks : les segmentations de profil de demande et de niveau de maturité de pièces ont été intégrées dans ce processus afin de l'aligner avec le processus de prévision et de mieux déterminer le niveau de service à utiliser dans les modèles de gestion des stocks.

- Processus intégré de prévision et de gestion des stocks : Des approches de sélection des méthodes de prévision sur la base de critères de gestion de stocks ont été proposées pour remplacer l'approche statistique classique : en intégrant le modèle de gestion de stock dans cette sélection, en considérant les priorités service/inventaire en fonction de la segmentation des pièces et en utilisant une méthode d'aide multicritères à la décision.

- Processus de prévision et gestion de stocks dans le cas de la différenciation client : La politique de rationnement des stocks a été adaptée au cas d'un modèle de gestion de stocks basé sur des prévisions, puis comparée avec les politiques à stock séparé et à stock commun en fonction des segmentations de profil de demande et de niveau de maturité des pièces.

Ces travaux ont été développés en parallèle d'une application industrielle au cas d'un des leaders mondiaux en ventes et services en systèmes médicaux GE Healthcare. Cette entreprise gère par une chaîne logistique globale et centralisée l'approvisionnement et le déploiement d'un nombre très important de références en pièces de rechange partout dans le monde, pour une grande base installée de produits et par un niveau d'inventaire très important. La maîtrise de ses fonctions de prévisions et d'approvisionnement des stocks est donc critique pour atteindre ses objectifs. Ce travail a pu aboutir à une révision complète de sa logique industrielle de gestion de stocks par : la mise en place d'une nouvelle segmentation des pièces considérant les aspects de variabilité et d'intermittence de la demande, la construction d'une logique décisionnelle de paramétrage des modèles utilisés en fonction de cette nouvelle segmentation, l'enrichissement de la base des méthodes utilisés par des méthodes scientifiques de prévision et l'implémentation de la démarche de prévision et de gestion de stocks présentée dans ce manuscrit. Ceci a pu contribuer à des améliorations significatives en niveaux de service et d'inventaire et surtout l'alignement du processus industriel avec une méthodologie scientifique ce qui constitue une base pour un ensemble d'améliorations futures.

Ces travaux peuvent motiver un ensemble de perspectives scientifiques en prévision et gestion de stocks des pièces de rechange, dont on peut citer :

- La combinaison des critères de segmentation : dans ce travail nous avons analysé les segmentations de profil de demande et de niveau de maturité des pièces d'une manière séparée. Une extension par combinaison de ces deux segmentations pourra renforcer le modèle décisionnel afin de construire les matrices des méthodes de prévision et des paramètres de modèle de gestion de stock adaptées à chaque combinaison.
- L'application à d'autres approches de prévision : Dans ces travaux nous avons appliqué notre proposition de sélection intégrée prévision/gestion de stocks au cas d'une approche de prévision paramétrique basée sur l'historique de la demande. Il convient de tester cette démarche au cas d'une approche de prévision non-paramétrique ou encore une approche basée sur les données de fiabilité, idéalement la comparaison de la performance de ces trois approches de prévision. Mais cette proposition est conditionnée par la disponibilité de ces données dans l'environnement de test.
- L'extension au cas de  $n$  classes clients : le travail de rationnement de stocks que nous avons présenté a été limité au cas de 2 classes clients. Il convient d'abord de l'étendre au cas de  $n$  classes clients, puis il semble intéressant de construire un modèle décisionnel du nombre de classes clients qu'on peut considérer dans le rationnement sans pour autant augmenter significativement le niveau de stock réservé.
- La politique de distribution de stocks : nous nous sommes limités ici au cas de la politique d'approvisionnement de stocks. Il convient de combiner ces travaux avec les décisions des politiques de distributions de stocks dans le réseau, par exemple de considérer les segmentations utilisées dans ces travaux dans la décision de centralisation ou décentralisation des stocks.

# Bibliographie

- [1] Christopher, M. Logistics and supply chain management: strategies for reducing costs and improving services. *Financial Times*, 1992, Vol. 1.
- [2] Barbuceanu, M., Teigen, R., & Fox, M. S. (1997, June). Agent based design and simulation of supply chain systems. In *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 1997. Proceedings., Sixth IEEE Workshops on* (pp. 36-41). IEEE.
- [3] Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. Supply chain management: more than a new name for logistics. *The international journal of logistics management*, 1997, vol. 8, no 1, p. 1-14.
- [4] Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. Defining supply chain management. *Journal of Business logistics*, 2001, vol. 22, no 2, p. 1-25.
- [5] Klein, R., & Rai, A. Interfirm strategic information flows in logistics supply chain relationships. *MIS Quarterly*, 2009, p. 735-762.
- [6] Pfohl, H. C., & Gomm, M. Supply chain finance: optimizing financial flows in supply chains. *Logistics research*, 2009, vol. 1, no 3-4, p. 149-161.
- [7] Papageorgiou, L. G., & Georgiadis, M. C. (Eds.). Supply chain optimization. Wiley-VCH, 2008.
- [8] Kleijnen, J. P. Supply chain simulation tools and techniques: a survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2005, vol. 1, no 1-2, p. 82-89.
- [9] Samaranayake, P. A conceptual framework for supply chain management: a structural integration. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2005, vol. 10, no 1, p. 47-59.
- [10] Stewart G. Supply-chain operations reference model (SCOR): the first cross-industry framework for integrated supply-chain management. *Logistics information management*, 1997, vol. 10, no 2, p. 62-67.
- [11] Stephens, S. Supply chain council & supply chain operations reference (scor) model overview. *Supply Chain Council, Inc.*, Pittsburgh, USA [<http://www.supplychain.org/>], 2001.
- [12] Cooper, Martha, Lisa M. Ellram, John T. Gardner, and Albert M. Hanks Meshing multiple alliances. *Journal of Business Logistics*, 1997, vol. 18, no 1, p. 67.
- [13] Stevens, Graham C. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 1989, vol. 19, no 8, p. 3-8.
- [14] Xu, L., & Beamon, B. M. Supply chain coordination and cooperation mechanisms: an attribute-based approach. *Journal of Supply Chain Management*, 2006, vol. 42, no 1, p. 4-12.
- [15] Lummus, R. R., & Vokurka, R. J. Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 1999, vol. 99, no 1, p. 11-17.
- [16] Gunasekaran, A., Patel, C., & Tirtiroglu, E. Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International journal of operations & production Management*, 2001, vol. 21, no 1/2, p. 71-87.
- [17] Stewart G. Supply chain performance benchmarking study reveals keys to supply chain excellence. *Logistics Information Management*, 1995, vol. 8, no 2, p. 38-44.
- [18] Svensson, C., & Jensen, T. The customer at the final frontier of mass customization. *The customer centric enterprise*. Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 329-345.
- [19] Fisher, M. L. What is the right supply chain for your product?. *Harvard business review*, 1997, vol. 75, p. 105-117.
- [20] Hult, G. T. M., Ketchen Jr, D. J., Adams, G. L., & Mena, J. A. Supply chain orientation and balanced scorecard performance. *Journal of Managerial Issues*, 2008, p. 526-544.
- [21] Mason-Jones, R., Naylor, B., & Towill, D. R. Lean, agile or leagile? Matching your supply chain to the marketplace. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38, no 17, p. 4061-4070.
- [22] Lele, M. M. After-sales service-necessary evil or strategic opportunity? *Managing Service Quality: An International Journal*, 1997, vol. 7, no 3, p. 141-145.
- [23] Gaiardelli, P., Saccani, N., & Songini, L. Performance measurement of the after-sales service network—Evidence from the automotive industry. *Computers in Industry*, 2007, vol. 58, no 7, p. 698-708.
- [24] Barcet, A. La montée des services, vers une économie de la servuction. 1987. *Thèse de doctorat. Lyon 2*.
- [25] Armistead, C., Clark, G. A framework for formulating after-sales support strategy. *International Journal of Operations & Production Management*, 1991, vol. 11, no 3, p. 111-124.
- [26] Karmarkar, U. S. The global information economy, service industrialization and the UCLA BIT project. *Service Science, Management and Engineering Education for the 21st Century*. Springer US, 2008. p. 243-250.



- [27] Shugan, S. M. Explanations for the Growth of Services. *Service Quality: New Directions in Theory and Practice*, 1994, p. 223-240.
- [28] Lele, M., How service needs influence product strategy. *Sloan Management Review*, 1986, vol. 28, no 1, p. 63-70.
- [29] FURRER O. Le Role Strategique des services autour des produits. *Revue française de gestion*, 1997, p. 98-108.
- [30] Bundschuh, R.G., Dezvane, T.M. How to make after-sales services pay off. *McKinsey Quarterly*, 2003, no 4, p. 116-127.
- [31] Baines, T. S., Lightfoot, H. W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., ... & Wilson, H. Manufacture, 221(10), 1543-1552. State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2007, vol. 221, no 10, p. 1543-1552.
- [32] Evans, S., Partidario, P. J., & Lambert, J. Industrialization as a key element of sustainable product-service solutions. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, no 18-19, p. 4225-4246.
- [33] Yang, L., Xing, K., & Lee, S. H. Framework for PSS from service perspective. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2010.
- [34] Gronroos, C. A service quality model and its marketing implications. *European Journal of marketing*, 1984, vol. 18, no 4, p. 36-44.
- [35] Bitner, Mary Jo Evaluating service encounters: the effects of physical surroundings and employee responses. *The Journal of Marketing*, 1990, p. 69-82.
- [36] Cronin Jr, J. J., & Taylor, S. A. Measuring service quality: a reexamination and extension. *The journal of marketing*, 1992, p. 55-68.
- [37] Bolton, Ruth N. and James H. Drew A longitudinal analysis of the impact of service changes on customer attitudes. *The Journal of Marketing*, 1991, p. 1-9.
- [38] Parasuraman, A., Valarie Zeithaml, and Leonard Berry A conceptual model of service quality and its implications for future research. *The Journal of Marketing*, 1985, p. 41-50.
- [39] NF EN 13306 (Octobre 2010) Maintenance - Terminologie de la maintenance - Homologuée
- [40] Cadwallader, L. C. Review of Maintenance and Repair Times for Components in Technological Facilities. *Idaho National Laboratory (INL)*, 2012.
- [41] Monchy, F & Vernier, JP. Maintenance-3ème édition-Méthodes et organisations: Méthodes et organisations. Dunod, 2010.
- [42] Goffin, K. Customer support: a cross-industry study of distribution channels and strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 1999, vol. 29, no 6, p. 374-398.
- [43] Haroun, A. E., & Duffuaa, S. O. Handbook of maintenance management and engineering. London : Springer, 2009.
- [44] Flexstudy Courses 2014 -How to manage maintenance-Chapter 1 organization structure
- [45] Saccani, N., Johansson, P., & Perona, M. Economics, 110(1), 52-69. Configuring the after-sales service supply chain: A multiple case study. *International Journal of Production Economics*, 2007, vol. 110, no 1, p. 52-69.
- [46] Cohen, M. A., & Agrawal, V. After-sales service supply chains: a benchmark update of the north American computer industry. *Fishman-Davidson Center for Service and Operations Management*, The Wharton School of the University of Pennsylvania (August 1999), 1999.
- [47] Kim, S. H., Cohen, M. A., & Netessine, S. Performance contracting in after-sales service supply chains. *Management Science*, 2007, vol. 53, no 12, p. 1843-1858.
- [48] Cohen, M. A., Zheng, Y. S., & Agrawal, V. Service parts logistics: a benchmark analysis. *IIE transactions*, 1997, vol. 29, no 8, p. 627-639.
- [49] Huiskonen, J. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. *International journal of production economics*, 2001, vol. 71, no 1, p. 125-133.
- [50] Hua, Z. S., Zhang, B., Yang, J., & Tan, D. S. A new approach of forecasting intermittent demand for spare parts inventories in the process industries. *Journal of the Operational Research Society*, 2007, vol. 58, no 1, p. 52-61.
- [51] <http://www.ge.com/about-us/fact-sheet>
- [52] <http://fortune.com/global500/>
- [53] <http://fortune.com/2013/07/08/the-most-profitable-companies-in-the-global-500/>
- [54] <http://www.forbes.com/global2000/list/>

- [55] Présentation divisions GE, département de communication de GEHC
- [56] <http://www.ge.com/about-us/building>
- [57] Welch, Jack, et al. *Winning*. Vol. 84. New York: HarperCollins, 2005.
- [58] Henderson, K. M., & Evans, J. R. Successful implementation of six sigma: benchmarking General Electric Company. *Benchmarking: An International Journal*, 2000, vol. 7, no 4, p. 260-282.
- [59] <http://www.ge.com/about-us/history/research-heritage>
- [60] [http://www.gepowercontrols.com/eu/product\\_portfolio/after\\_sales/](http://www.gepowercontrols.com/eu/product_portfolio/after_sales/)
- [61] <http://newsroom.gehealthcare.com/century-invention-ge-healthcare-envisioned-imaging-innovation/>
- [62] <http://www3.gehealthcare.com/en/products/categories>
- [63] Flores BE, Whybark DC. Implementing multicriteria ABC analysis. *Engineering Costs and Production Economics* 1988;15:191-5.
- [64] Regattieri, A., Gamberi, M., Gamberini, R., & Manzini, R. Managing lumpy demand for aircraft spare parts. *Journal of Air Transport Management*, 2005, vol. 11, no 6, p. 426-431.
- [65] Bartezzaghi E, Verganti R, Zotteri G. A simulation framework for forecasting uncertain lumpy demand. *International Journal of Production Economics*, 1999, vol. 59, no 1, p. 499-510.
- [66] Kennedy, W. J., Wayne Patterson, J., & Fredendall, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of production economics*, 2002, vol. 76, no 2, p. 201-215.
- [67] Eaves, A. H. C., & Kingsman, B. G. Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, vol. 55, no 4, p. 431-437.
- [68] Kranenburg, A. A., & Van Houtum, G. J. Service differentiation in spare parts inventory management. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, vol. 59, no 7, p. 946-955.
- [69] T. Nakagawa. Generalized Models for Determining Optimal Number of Minimal Repairs Before Replacement. *Journal of the Operational Research Society*. Japan., 1981, vol. 24, no 4, p. 325-337.
- [70] S.G. Allen, D.A. D'esopo. An ordering policy for repairable stock items. *Operations Research*, 1968, vol. 16, no 3, p. 669-674.
- [71] V.P. Simpson. Optimum solution structure for a repairable inventory problem. *Operations Research*, 1978, vol. 26, no 2, p. 270-281.
- [72] Définition de la prévision du centre national de ressources textuelles et lexicales CNRTL unité du CNRS
- [73] Chevillon, G. Analyse économétrique et compréhension des erreurs de prévision. 2005.
- [74] Armstrong, J. S. From crystal ball to computer. New York ua, 1985.
- [75] Martino, J. P. Technological forecasting for decision making. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [76] Williams, M. A., Gärdenfors, P., Johnston, B., & Wightwick, G. Anticipation as a strategy: a design paradigm for robotics. *Knowledge Science, Engineering and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 341-353.
- [77] Archer, B., Ritchie, J. R. B., & Goeldner, C. R. Demand forecasting and estimation. *Travel, tourism, and hospitality research*. A handbook for managers and researchers, 1987, p. 77-85.
- [78] Dalrymple, D. J. Sales forecasting practices: Results from a United States survey. *International Journal of Forecasting*, 1987, vol. 3, no 3, p. 379-391.
- [79] Hyndman, R., Koehler, A. B., Ord, J. K., & Snyder, R. D. Forecasting with exponential smoothing: the state space approach. *Springer Science & Business Media*, 2008.
- [80] Syntetos, A. Forecasting of intermittent demand. *Doctoral dissertation, Brunel University*. 2001.
- [81] Syntetos, A. A., & Boylan, J. E. On the bias of intermittent demand estimates. *International journal of production economics*, 2001, vol. 71, no 1, p. 457-466.
- [82] Boylan, J. E., & Syntetos, A. A. Spare parts management: a review of forecasting research and extensions. *IMA journal of management mathematics*, 2009, p. dpp016.
- [83] Syntetos, A. A., Boylan, J. E., & Croston, J. D. On the categorization of demand patterns. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, vol. 56, no 5, p. 495-503.
- [84] Johnston, F. R., & Boylan, J. E. Forecasting for items with intermittent demand. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, p. 113-121.
- [85] Croston, J. D. Forecasting and stock control for intermittent demands. *Operational research quarterly*, 1972, p. 289-303.
- [86] Willemain, T. R., Smart, C. N., & Schwarz, H. F. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of forecasting*, 2004, vol. 20, no 3, p. 375-387.

- [87] Gutierrez, R. S., Solis, A. O., & Mukhopadhyay, S. Lumpy demand forecasting using neural networks. *International Journal of Production Economics*, 2008, vol. 111, no 2, p. 409-420.
- [88] R.J. Hyndman, and A.B. Koehler. Another look at measures of forecast accuracy. *International journal of forecasting*, 2006, vol. 22, no 4, p. 679-688.
- [89] Villemers, R. L'organisation industrielle: principes et applications. *Soc. d'Editions Françaises et Internationales*, 1947.
- [90] CARSON, Gordon B. Production Handbook, 2." ed. 1958.
- [91] Axsäter, S. Inventory control. *Springer Science & Business Media*, 2007.
- [92] Geraghty, J., & Heavey, C.A comparison of hybrid push/pull and CONWIP/pull production inventory control policies. *International Journal of Production Economics*, 2004, vol. 91, no 1, p. 75-90.
- [93] Andersson, J., & Marklund, J. Decentralized inventory control in a two-level distribution system. *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 127, no 3, p. 483-506.
- [94] Sahin, F., & Robinson Jr, E. P. Information sharing and coordination in make-to-order supply chains. *Journal of operations management*, 2005, vol. 23, no 6, p. 579-598.
- [95] Rajagopalan, S. Make to order or make to stock: model and application. *Management Science*, 2002, vol. 48, no 2, p. 241-256.
- [96] Johnson, L. A., & Montgomery, D. C. Operations research in production planning, scheduling, and inventory control. New York : Wiley, 1974.
- [97] Hanssman, F. Optimal inventory location and control in production and distribution networks. *Operations Research*, 1959, vol. 7, no 4, p. 483-498.
- [98] Axsäter, S. Continuous review policies for multi-level inventory systems with stochastic demand. *Handbooks in operations research and management science*, 1993, vol. 4, p. 175-197.
- [99] Graves, S. C. A single-item inventory model for a nonstationary demand process. *Manufacturing & Service Operations Management*, 1999, vol. 1, no 1, p. 50-61.
- [100] Archibald, B. C. Continuous review (s, S) policies with lost sales. *Management Science*, 1981, vol. 27, no 10, p. 1171-1177.
- [101] Presman, E., & Sethi, S. P. Inventory models with continuous and Poisson demands and discounted and average costs. *Production and Operations Management*, 2006, vol. 15, no 2, p. 279-293.
- [102] Ouyang, L. Y., & Wu, K. S. Mixture inventory model involving variable lead time with a service level constraint. *Computers & Operations Research*, 1997, vol. 24, no 9, p. 875-882.
- [103] Swenseth, S. R., & Godfrey, M. R. Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics*, 2002, vol. 77, no 2, p. 113-130.
- [104] Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D., & Jardine, A. K. Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, vol. 62, no 6, p. 992-1004.
- [105] Bacchetti, A., & Saccani, N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 2012, vol. 40, no 6, p. 722-737.
- [106] Mukhopadhyay SK, Pathak K, Guddu K. Development of decision support system for stock control at area level in mines. *IE (I) Journal-MN*, 2003, vol. 84, p. 11-16.
- [107] Veinott, A.F.J. Optimal policy in a dynamic, single product, nonstationary inventory model with several demand classes. *Operations Research*, 1965, vol. 13, no 5, p. 761-778.
- [108] Nahmias S, Demmy S. Operating characteristics of an inventory system with rationing. *Management Science*, 1981, vol. 27, no 11, p. 1236-1245.
- [109] Flores, B. E., & Whybark, D. C. Multiple criteria ABC analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 1986, vol. 6, no 3, p. 38-46.
- [110] Jouni, P., Huiskonen, J., & Pirttilä, T. Improving global spare parts distribution chain performance through part categorization: A case study. *International Journal of Production Economics*, 2011, vol. 133, no 1, p. 164-171.
- [111] Boone CA, Craighead CW, Hanna JB. Critical challenges of inventory management in service parts supply: A Delphi study. *Operations Management Research*, 2008, vol. 1, no 1, p. 31-39.
- [112] Varghese V, Rossetti M. A Classification Approach for Selecting Forecasting Techniques for Intermittent Demand. *Proceedings of the 2008 Industrial Engineering Research Conference*. 2008. p. 863.
- [113] Ghobbar, A. A., & Friend, C. H. Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations. *Journal of Air Transport Management*, 2002, vol. 8, no 4, p. 221-231.

- [114] Snyder, R. (2002). Forecasting sales of slow and fast moving inventories. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 140, no 3, p. 684-699.
- [115] Williams T.M. Stock control with sporadic and slow-moving demand. *Journal of the Operational Research Society*, 1984, p. 939-948.
- [116] Ghobbar AA., Friend CH. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. *Computers & Operations Research*, 2003, vol. 30, no 14, p. 2097-2114.
- [117] Hunter, J. S. (1986). The exponentially weighted moving average. *J. Quality Technol.*, 1986, vol. 18, no 4, p. 203-210.
- [118] Gardner, E. S, Commander, Jr. Exponential smoothing: The state of the art. *Journal of forecasting*, 1985, vol. 4, no 1, p. 1-28.
- [119] Rao AV. A comment on: forecasting and stock control for intermittent demands. *Journal of the Operational Research Society*, 1973, vol. 24, no 4, p. 639-640.
- [120] Shale EA, Boylan JE, Johnston FR. Forecasting for intermittent demand: the estimation of an unbiased average. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, vol. 57, no 5, p. 588-592.
- [121] Teunter, R.H., Syntetos, A.A., Zied Babai, M. Intermittent demand: Linking forecasting to inventory obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 2011, vol. 214, no 3, p. 606-615.
- [122] Romeijnnders, W., Teunter, R.H. A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 220, no 2, p. 386-393.
- [123] Zhou, C., & Viswanathan, S. Comparison of a new bootstrapping method with parametric approaches for safety stock determination in service parts inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 2011, vol. 133, no 1, p. 481-485.
- [124] Amin-Naseri, M. R., & Tabar, B. R. Neural network approach to lumpy demand forecasting for spare parts in process industries. *Computer and Communication Engineering*, 2008. ICCCE 2008. International Conference on. IEEE, 2008. p. 1378-1382.
- [125] Syntetos, A. A., Babai, M. Z., & Gardner, E. S. Forecasting intermittent inventory demands: simple parametric methods vs. bootstrapping. *Journal of Business Research*, 2015.
- [126] Zorgdrager, M., Curran, R., Verhagen, W. J., Boesten, B. H. L., & Water, C. N. A predictive method for the estimation of material demand for aircraft non-routine maintenance. 2013.
- [127] Gardner, E. S., & Dannenbring, D. G. Forecasting with exponential smoothing: Some guidelines for model selection. *Decision Sciences*, 1980, vol. 11, no 2, p. 370-383.
- [128] Brown RG. Exponential smoothing for predicting demand. *OPERATIONS RESEARCH MANAGEMENT SCIENCES*, 1957. p. 145-145.
- [129] Holt, C. C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International journal of forecasting*, 2004, vol. 20, no 1, p. 5-10.
- [130] Winters, P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, 1960, vol. 6, no 3, p. 324-342.
- [131] J.S. Armstrong, and F. Collopy Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International journal of forecasting*, 1992, vol. 8, no 1, p. 69-80.
- [132] A.A. Syntetos, and J.E Boylan. The accuracy of intermittent demand estimates. *International Journal of forecasting*, 2005, vol. 21, no 2, p. 303-314.
- [133] R.J. Hyndman, and A.B. Koehler. Another look at measures of forecast accuracy. *International journal of forecasting*, 2006, vol. 22, no 4, p. 679-688.
- [134] Pareto, V.. Manual of political economy. 1971.
- [135] Dickie, H. F. ABC inventory analysis shoots for dollars not pennies. *Factory Management and Maintenance*, 1951, vol. 109, no 7, p. 92-94.
- [136] Gajpal PP, Ganesh LS, Rajendran C. Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 1994, vol. 35, no 1, p. 293-297.
- [137] Bose, D. C. (2006). Inventory management. PHI Learning Pvt. Ltd..
- [138] Rao, U. S. Properties of the periodic review (R, T) inventory control policy for stationary, stochastic demand. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2003, vol. 5, no 1, p. 37-53.
- [139] Andersson, J., & Melchior, P. A two-echelon inventory model with lost sales. *International Journal of Production Economics*, 2001, vol. 69, no 3, p. 307-315.
- [140] Altioek, T., & Shiue, G. A. Single-stage, multi-product production/inventory systems with backorders. *IIE transactions*, 1994, vol. 26, no 2, p. 52-61.

- [141] Dallery, Y., and Z. Babai. Inventory management: forecast based approach vs. standard approach. *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Marrakech. 2005. p. 1-10.
- [142] E. A. Silver. A modified formula for calculating customer service under continuous inventory review. *AIIE Transactions*, 1970, vol. 2, no 3, p. 241-245.
- [143] Snyder, R. D., Koehler, A. B., & Ord, J. K. Forecasting for inventory control with exponential smoothing. *International Journal of Forecasting*, 2002, vol. 18, no 1, p. 5-18.
- [144] E. Levén, and A. Segerstedt. Inventory control with a modified Croston procedure and Erlang distribution. *International Journal of Production Economics*, 2004, vol. 90, no 3, p. 361-367.
- [145] L. Tiacci, and S. Saetta. An approach to evaluate the impact of interaction between demand forecasting method and stock control policy on the inventory system performances. *International Journal of Production Economics*, 2009, vol. 118, no 1, p. 63-71.
- [146] Roy, B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. *Kluwer Academic*. 1996.
- [147] Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. *Springer Science & Business Media*, 2005.
- [148] Laurent Henriët. Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision: Construction de modèles et procédures d'affectation. 2000. *Thèse de doctorat. Université Paris Dauphine-Paris IX*.
- [149] L. Simpson. Do decision makers know what they prefer?: MAVT and ELECTRE II. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, p. 919-929.
- [150] Roy, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, 1991, vol. 31, no 1, p. 49-73.
- [151] Mouine, M. Combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité. 2011. *Thèse de doctorat. Université Laval*.
- [152] Benjaafar, S., & Elhafsi, M. A production-inventory system with both patient and impatient demand classes. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 9, no 1, p. 148-159.
- [153] Dekker, R., Kleijn, M. J., & De Rooij, P. J. A spare parts stocking policy based on equipment criticality. *International Journal of Production Economics*, 1998, vol. 56, p. 69-77.
- [154] Kleijn, M.J./ Dekker, R. Using break quantities for tactical optimisation in multi-stage distribution systems. *Springer Berlin Heidelberg*, 1998.
- [155] Lee, T. C., & Hersh, M. A model for dynamic airline seat inventory control with multiple seat bookings. *Transportation Science*, 1993, vol. 27, no 3, p. 252-265.
- [156] Green, L. V., Savin, S., & Wang, B. Managing patient service in a diagnostic medical facility. *Operations Research*, 2006, vol. 54, no 1, p. 11-25.
- [157] Prastacos, G. P. Blood inventory management: an overview of theory and practice. *Management Science*, 1984, vol. 30, no 7, p. 777-800.
- [158] Teunter, R. H., & Klein Haneveld, W. K. Dynamic inventory rationing strategies for inventory systems with two demand classes, Poisson demand and backordering. *European Journal of Operational Research*, 2008, vol. 190, no 1, p. 156-178.
- [159] Topkis D. Optimal ordering and rationing policies in a nonstationary dynamic inventory model with n demand classes. *Management Science*, 1968, vol. 15, no 3, p. 160-176.
- [160] Ha, A. Y. Inventory rationing in a make-to-stock production system with several demand classes and lost sales. *Management Science*, 1997, vol. 43, no 8, p. 1093-1103.
- [161] Ha, A. Y. Stock rationing in an M/Ek/1 make-to-stock queue. *Management Science*, 2000, vol. 46, no 1, p. 77-87.
- [162] Deshpande, V., Cohen, M. A., & Donohue, K. A threshold inventory rationing policy for service-differentiated demand classes. *Management Science*, 2003, vol. 49, no 6, p. 683-703.
- [163] Melchior P. Restricted time-remembering policies for the inventory rationing problem. *International Journal of Production Economics*, 2003, vol. 81, p. 461-468.
- [164] Koçağa, Y. L., & Şen, A. Spare parts inventory management with demand lead times and rationing. *IIE Transactions*, 2007, vol. 39, no 9, p. 879-898.
- [165] Sapna Isotupa K.P. An (s, Q) Markovian inventory system with lost sales and two demand classes. *Mathematical and computer modelling*, 2006, vol. 43, no 7, p. 687-694.

- [166] Tempelmeier, H. Supply chain inventory optimization with two customer classes in discrete time. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 174, no 1, p. 600-621.
- [167] Kranenburg AA, Van Houtum GJ. Cost optimization in the (S-1, S) lost sales inventory model with multiple demand classes. *Operations Research Letters*, 2007, vol. 35, no 4, p. 493-502.
- [168] Arslan H, Graves SC, Roemer TA. A single-product inventory model for multiple demand classes. *Management Science*, 2007, vol. 53, no 9, p. 1486-1500.
- [169] Sivakumar B, Arivarignan G. A modified lost sales inventory system with two types of customers. *Quality Technology and Quantitative Management*, 2008, vol. 5, no 4, p. 339-349.
- [170] Möllering KT, Thonemann UW. An optimal critical level policy for inventory systems with two demand classes. *Naval Research Logistics (NRL)*, 2008, vol. 55, no 7, p. 632-642.







# Thèse de Doctorat

Adnane LAZRAK

## Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange

The improvement of forecasting and inventory management processes in the  
case of spare parts supply chain

### Résumé

Le cadre général des travaux de cette thèse est la chaîne logistique des pièces de rechange et particulièrement l'amélioration de sa performance en prévision et en gestion des stocks à plusieurs niveaux de service. La spécificité d'une demande faible et erratique ne permet pas l'utilisation des approches classiques de prévision. Par ailleurs, les mesures de performance associées reposant sur des indicateurs purement statistiques ne reflètent pas nécessairement les objectifs de gestion d'une chaîne logistique qui cherche à s'aligner avec différents niveaux d'exigence des contrats de maintenance.

Après une description des processus et des outils en prévision et en gestion de stocks utilisés dans ce contexte, ces travaux proposent de nouvelles approches de sélection des méthodes de prévisions qui intègrent prévision et gestion de stocks, qui permettent la priorisation en service ou en inventaire et qui utilisent une segmentation par profil de la demande et par niveau de maturité des pièces. Par la suite, ces travaux considèrent le cas de la différenciation client dans le modèle de gestion de stocks basé sur des prévisions, en comparant la performance de la politique à niveau critique avec les politiques classiques à stock commun ou séparé. Chaque processus étudié a été accompagné d'une analyse comparative entre différentes méthodes de prévisions et politiques de gestion de stocks sur des données réelles du cas d'application industrielle de la chaîne logistique de GE Healthcare. Ce qui a permis de construire un ensemble de recommandations en fonction de la segmentation de la pièce et des priorités des décideurs.

### Mots clés

Chaîne logistique des pièces de rechange, segmentation, méthode de prévision, politique de gestion de stocks, différenciation client, analyse de performance.

### Abstract

The main scope of these works is the spare parts supply chain management, particularly the improvement of forecasting and inventory management performance. The specificity of low and erratic demand does not allow the use of conventional approaches of forecasting. Moreover, the associated performance measurements, based on purely statistical indicators, are not adapted to this context. Indeed, it should align with different levels of expectations of the maintenance contracts.

After a presentation of the processes and tools used by the dedicated literature. Here we propose new performance analysis approaches seeking to combine the statistical performance of forecasting methods and inventory management performance while considering decision makers priorities and using demand pattern as well as parts age segmentations. These works also address the use of customer differentiation in the inventory model based on forecasting, by comparing the performance of the critical level policy with the common stock and separated stock policies.

Each studied process was associated with a comparative analysis of different forecasting methods and inventory management models based on real data of the spare parts supply chain of GE Healthcare, which allowed us to define a set of methods and parameters recommendations according to both part segmentations and supply chain priorities.

### Keywords

Spare parts supply chain management, forecasting methods, inventory management, parts segmentation, customer segmentation, performance analysis.